

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS  
CAMPUS A. C. SIMÕES  
INSTITUTO DE QUÍMICA E BIOTECNOLOGIA  
QUÍMICA TECNOLÓGICA E INDUSTRIAL

WEMERSON JOSÉ DA SILVA

**UTILIZAÇÃO DE VIDROS RECICLADOS EM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DE  
FRITAS NA PRODUÇÃO DE REVESTIMENTOS CERÂMICOS**

Maceió/AL

2024

WEMERSON JOSÉ DA SILVA

**UTILIZAÇÃO DE VIDROS RECICLADOS EM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DE  
FRITAS NA PRODUÇÃO DE REVESTIMENTOS CERÂMICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Química Tec. e Industrial da Universidade Federal de Alagoas, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharelado em Química Tecnológica e Industrial.

Orientador: Prof. Dr. José Edmundo Accioly Souza.

Maceió/AL

2024

**Catálogo na fonte**  
**Universidade Federal de Alagoas**  
**Biblioteca Central**  
**Divisão de Tratamento Técnico**

Bibliotecária: Helena Cristina Pimentel do Vale – CRB4 –661

- S586u Silva, Wemerson José da.  
Utilização de vidros reciclados em substituição parcial de fritas na produção de revestimentos cerâmicos / Wemerson José da Silva. – 2024.  
57 f : il.
- Orientador: José Edmundo Accioly de Souza.  
Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso em Química Tecnológica e Industrial)  
– Universidade Federal de Alagoa, Instituto de Química e Biotecnologia. Maceió, 2024.
- Bibliografia: f. 56-57.
1. Resíduos cerâmicos. 2. Vidro reciclado. 3. Economia circular. 4. Sustentabilidade.  
5. Eficiência industrial. I. Título.

CDU: 666.7

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, pela força, sabedoria e saúde que me permitiram chegar até aqui, superando cada desafio com fé e perseverança. Sem Ele, nada seria possível.

À minha esposa, Jéssica, meu maior suporte e fonte de inspiração, paciência e compreensão ao longo desta jornada. Seu apoio foi fundamental em cada etapa desse trabalho. Ao meu filho Bernardo, cuja alegria e inocência me encham de esperança e motivação, mesmo nos dias mais difíceis.

Aos meus pais e irmãos, por acreditarem em mim e me incentivarem desde sempre. A vocês, que sempre estiveram ao meu lado, meu mais sincero agradecimento. Aos amigos, que de diferentes maneiras contribuíram para o sucesso desta conquista, obrigado pela amizade e encorajamento.

Um agradecimento especial ao Maurício, meu supervisor no trabalho, pela compreensão, confiança e flexibilidade, que me permitiram conciliar as responsabilidades profissionais com este projeto.

Alguém que não posso me esquivar de agradecer é a Anizia Lino, minha amiga e interlocutora com quem pude contar para me apoiar e fornecer valiosos conselhos e dicas nessa difícil caminhada.

E, finalmente, ao professor José Edmundo Accioly Souza, meu orientador, pela orientação competente, paciência e dedicação durante todo o desenvolvimento deste trabalho. Suas sugestões e ensinamentos foram essenciais para a concretização deste projeto.

A todos vocês, minha eterna gratidão.

*"A sustentabilidade é o caminho para prosperidade de longo prazo."*

– Ban Ki-moon

## RESUMO

Esse trabalho apresenta uma pesquisa acadêmica focada no aproveitamento de resíduos cerâmicos, com ênfase na produção de materiais como fritas, engobes e esmaltes. O objetivo principal é minimizar perdas econômicas, promover a economia circular e garantir a sustentabilidade socioeconômica da indústria cerâmica e do meio ambiente. A pesquisa foi conduzida no laboratório da empresa Esmalglass-Itaca, e foi estruturada em duas etapas: Revisão Bibliográfica e Experimentação. O foco central é investigar a viabilidade do uso de vidros reciclados provenientes de eletrônicos e janelas na formulação de engobes cerâmicos, como uma solução inovadora para a gestão de resíduos cerâmicos. Entre os objetivos específicos, destacam-se a classificação de cerâmicas e fritas, a análise de suas propriedades e a verificação da viabilidade técnica de incorporação de resíduos. A revisão bibliográfica abordou estudos sobre o reaproveitamento de resíduos na produção de fritas e revestimentos cerâmicos, com ênfase em dois tipos de vidros reciclados: os provenientes de eletrônicos (CRT) e os vidros planos (janelas). A experimentação consistiu na formulação de engobes cerâmicos com substituição parcial de matérias-primas tradicionais por esses vidros reciclados. A fundamentação teórica inclui a definição, características e processos de fabricação de cerâmicas, engobes e esmaltes, além de descrever várias categorias de cerâmicas (como vermelha, branca, refratária e avançada) e diferentes tipos de fritas cerâmicas (alcalinas, borácicas e zinco-alcalinas). Na fase experimental, foram elaboradas quatro formulações de engobes, incorporando diferentes proporções de vidro CRT e vidro plano (5% e 10%), que foram aplicadas sobre bases cerâmicas e queimadas a 1.140°C. O desempenho foi avaliado a partir de testes de impermeabilidade e estética. O presente trabalho não se limita, portanto, à produção de cerâmicas e à fabricação de fritas e revestimentos. Ele também destaca a importância de técnicas de reciclagem de resíduos, visando aumentar a eficiência industrial e promover a sustentabilidade ambiental, integrando a economia circular no setor cerâmico.

**Palavras-chave:** Resíduos cerâmicos, Vidro reciclado, Economia circular, Sustentabilidade e Eficiência industrial

## ABSTRACT

This paper presents an academic research focused on the utilization of ceramic waste, emphasizing the production of materials such as frits, engobes, and glazes. The main objective is to minimize economic losses, promote the circular economy, and ensure the socioeconomic sustainability of the ceramic industry and the environment. The research was conducted in the laboratory of the Esmalglass-Itaca company and was structured in two stages: Literature Review and Experimentation. The central focus is to investigate the feasibility of using recycled glass from electronics and windows in the formulation of ceramic engobes, as an innovative solution for ceramic waste management. Among the specific objectives are the classification of ceramics and frits, the analysis of their properties, and the verification of the technical feasibility of incorporating waste. The literature review covered studies on the reuse of waste in the production of frits and ceramic coatings, with an emphasis on two types of recycled glass: those from electronics (CRT) and flat glass (windows). The experimentation involved the formulation of ceramic engobes with the partial substitution of traditional raw materials by these recycled glasses. The theoretical foundation includes the definition, characteristics, and manufacturing processes of ceramics, engobes, and glazes, in addition to describing various categories of ceramics (such as red, white, refractory, and advanced) and different types of ceramic frits (alkaline, borax-based, and zinc-alkaline). In the experimental phase, four engobe formulations were developed, incorporating different proportions of CRT glass and flat glass (5% and 10%), which were applied to ceramic bases and fired at 1,140°C. The performance was evaluated based on impermeability and aesthetic tests. Therefore, this paper not only focuses on ceramic production and the manufacturing of frits and coatings, but also highlights the importance of waste recycling techniques aimed at increasing industrial efficiency and promoting environmental sustainability, integrating the circular economy into the ceramic sector.

**Keywords:** Ceramic waste, Recycled glass, circular economy, sustainability, and industrial efficiency.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama do processo de fabricação de pisos e azulejos cerâmicos. ....	17
Figura 2 - Diagrama do processo de fabricação de fritas .....	23
Figura 3 - Máquina de fusão.....	32
Figura 4 - Perola para análise FRX. ....	32
Figura 5 - Espectrômetro de FRX. ....	33
Figura 6 - vidro reciclado mais caulim.....	34
Figura 7 - Amostras moídas. ....	34
Figura 8 - Provas de engobe moídas.....	36
Figura 9 - Aplicação dos engobes em base crua. ....	37
Figura 10 - Corpo de prova queimado. ....	38
Figura 11 - Solução corante. ....	39
Figura 12 - Aplicação do corante no corpo de prova queimado.....	39
Figura 13 - Avaliação do teste da macha.....	49
Figura 14 - Economia gerada pela substituição de frita por vidros reciclados.....	52

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 - Materiais utilizados .....	28
Tabela 2 - Formulas de engobes .....	35
Tabela 3 - Analise química do vidro CTR.....	44
Tabela 4 - Análise química do vidro plano.....	44

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

**Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>** – Óxido de Alumínio (Alumina)

**CaO** – Óxido de Cálcio

**CRT** – Tubo de Raios Catódicos (Cathode Ray Tube)

**FRX** – Fluorescência de Raios X

**K<sub>2</sub>O** – Óxido de Potássio

**MgO** – Óxido de Magnésio

**Na<sub>2</sub>O** – Óxido de Sódio

**P1, P2, P3, P4** – Provas 1, 2, 3 e 4 (amostras de engobes testadas)

**PbO** – Óxido de Chumbo

**Scopus** – Base de dados científica

**ScienceDirect** – Base de dados científica

**SiO<sub>2</sub>** – Dióxido de Silício (Sílica)

**STD** – Standard (Padrão)

**TiO<sub>2</sub>** – Dióxido de Titânio

## SUMÁRIO

<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	13
<b>RESUMO</b> .....	15
<b>ABSTRACT</b> .....	16
<b>Keywords:</b> Ceramic waste, Recycled glass, circular economy, sustainability, and industrial efficiency.....	16
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	17
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	18
<b>LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS</b> .....	19
<b>SUMÁRIO</b> .....	20
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	11
<b>2. OBJETIVOS</b> .....	15
<b>2.1 Objetivo geral:</b> .....	15
<b>2.2 Objetivos Específicos:</b> .....	15
<b>3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	16
<b>3.1 Definição e características dos principais tipos de cerâmicas e fritas utilizadas na indústria.</b> .....	16
<b>3.1.1 Cerâmicas</b> .....	16
<b>3.1.2 Seleção e Preparação das Matérias-Primas</b> .....	16
<b>3.1.3 Formação das Peças</b> .....	16
<b>3.1.4 Secagem</b> .....	16
<b>3.1.5 Aplicação de Engobe e Esmalte</b> .....	17
<b>3.1.6 Queima</b> .....	17
<b>3.1.7 Resfriamento e Controle de Qualidade</b> .....	17
<b>3.2 As principais categorias de cerâmicas na indústria</b> .....	18
<b>3.2.1 Cerâmica Vermelha</b> .....	18
<b>3.2.2 Cerâmica Branca</b> .....	18
<b>3.2.3 Refratários</b> .....	18
<b>3.2.4 Cerâmicas Avançadas</b> .....	18
<b>3.3 Fritas.</b> .....	18
<b>3.3.1 Fritas Alcalinas (Fritas Transparentes)</b> .....	19
<b>3.3.2 Fritas Borácicas (Fritas de Baixa Fusão)</b> .....	19
<b>3.3.3 Fritas Zinco-Alcalinas (Fritas Opacas)</b> .....	20
<b>3.3.4 Fritas Plumbíferas (Fritas de Brilho Elevado ou Fritas de Chumbo)</b> .....	20

3.3.5 Fritas Mate ( <i>Fritas para Esmaltes Foscos</i> ).....	20
3.3.6 Fritas Brancas ( <i>Fritas Opacificantes</i> ).....	20
3.4 <b>Processo de fabricação das fritas</b> .....	20
3.4.1 <b>Objetivo da Fritagem</b> .....	20
3.4.2 <b>Vantagens da Fritagem</b> .....	21
3.4.3 <b>Preparação das Matérias-Primas</b> .....	21
3.4.4 <b>Fusão das Matérias-Primas no Forno</b> .....	21
3.4.5 <b>Processo Completo de Fusão e Resfriamento</b> .....	22
3.4.6 <b>Automatização do Processo</b> .....	22
3.5 <b>Revestimentos cerâmicos</b> .....	23
3.5.1 <b>Engobe</b> .....	23
3.5.2 <b>Esmalte</b> .....	25
4 <b>METODOLOGIA</b> .....	27
4.1 <b>Seleção dos Materiais</b> .....	27
4.2 <b>Materiais utilizados</b> .....	28
4.3 <b>Tubos de raios catódicos</b> .....	29
4.4 <b>Vidro plano</b> .....	30
4.5 <b>Procedimento experimental</b> .....	31
4.5.1 <b>Análise química dos vidros reciclados</b> .....	31
4.5.2 <b>Procedimento experimental da análise química</b> .....	31
4.5.3 <b>Planejamento das formulações</b> .....	33
4.5.4 <b>Formulação dos Engobes</b> .....	34
4.5.5 <b>Processamento das formulações</b> .....	36
4.5.6 <b>Aplicação dos engobes</b> .....	37
4.5.7 <b>Processo de queima</b> .....	37
4.5.8 <b>Resumo do procedimento experimental</b> .....	40
5 <b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	41
5.1 <b>Características dos vidros reciclados</b> .....	41
5.2.1 <b>Composição Química Controlada</b> .....	42
5.2.2 <b>Prevenção de Contaminantes Indesejados</b> .....	42
5.2.3 <b>Consistência e Reprodutibilidade</b> .....	42
5.2.4 <b>Propriedades Físico-Químicas</b> .....	43
5.2.5 <b>Eficiência Energética</b> .....	43
5.2.6 <b>Compatibilidade com Outras Matérias-Primas</b> .....	43
5.2.7 <b>Controle de Propriedades Estéticas</b> .....	43

<b>5.3 Planejamento das formulações.....</b>	<b>44</b>
<b>5.4 Formulação dos Engobes.....</b>	<b>45</b>
<b>5.5 Análise do produto acabado .....</b>	<b>47</b>
<b>5.6 Teste da mancha .....</b>	<b>48</b>
<b>5.7 Viabilidade econômica na utilização dos vidros reciclados .....</b>	<b>50</b>
<b>Substituição de 10% de frita por vidro reciclado:.....</b>	<b>51</b>
<b>6 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>53</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>55</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Os variados recursos de que o ser humano dispôs desde tempos pré-históricos moldaram seu estilo de vida e limitaram suas oportunidades de progresso cultural. A posse de certo material e o conhecimento para obtê-lo, explorá-lo e aplicá-lo, desde a confecção de machados de sílex até a utilização de semicondutores, têm conferido poder e controle a alguns grupos sobre outros. Em épocas antigas, esse poder muitas vezes se baseava na disponibilidade de ferramentas cada vez mais robustas, capazes de serem empregadas com força tanto defensiva quanto ofensivamente para subjugar adversários. Mais recentemente, o poder reside no domínio econômico proporcionado por materiais sofisticados, permitindo o desenvolvimento de tecnologias avançadas de informação e comunicação, entre outras. (NAVARRO, J.M.F. - EL VIDRIO)

A relevância dos materiais em cada período histórico foi tão significativa que alguns deles nomearam longas eras em que foram predominantemente utilizados: Era da Pedra, Era do Bronze, Era do Ferro. O vidro não emprestou seu nome a nenhum desses períodos, mas esteve presente em todos. Pode-se afirmar que, entre todos os materiais utilizados pelo homem, é o vidro que o acompanhou mais consistentemente desde os primórdios da humanidade, em todo o mundo, permitindo-lhe sempre unir utilidade e beleza. Ao longo de sua história milenar, o vidro foi integrado à cultura das sociedades, primeiro como parte de suas expressões artísticas e mais tarde contribuindo para expandir o conhecimento científico e tecnológico. (NAVARRO, J.M.F. - EL VIDRIO)

A origem dos primeiros objetos de vidro artificial não pode ser determinada com precisão tanto em termos geográficos quanto cronológicos. A descoberta do fogo proporcionou ao homem acesso a altas temperaturas, possibilitando o desenvolvimento das artes do fogo: cerâmica, metalurgia e vidraria. É bastante provável que o primeiro vidro tenha sido produzido acidentalmente como consequência dessas atividades iniciais. Alguns estudiosos acreditam que o vidro foi descoberto pelos primeiros fundidores de metais, possivelmente durante o processamento de minérios de cobre, já que esse processo gera escórias vítreas opacas e coloridas. Essa teoria é apoiada pelo fato de que os primeiros vidros ou pastas de vidro eram azul-esverdeados. No entanto, é igualmente plausível que a descoberta do vidro tenha ocorrido entre os primeiros oleiros, devido à vitrificação acidental por superaquecimento de uma de suas peças de argila cozida. De qualquer forma, o vidro inicialmente surgiu como um subproduto. (NAVARRO, J.M.F. - EL VIDRIO)

Embora o vidro possa ter aparecido dessa maneira, a produção do primeiro objeto de vidro propriamente dito ainda estava distante, e a cerâmica se espalhou muito antes entre os povos primitivos, pois a argila, sendo mais fácil de moldar, era mais manejável que o vidro e assumia as diversas formas desejadas pelo homem. O desenvolvimento da cerâmica foi tão significativo e sua associação com cada civilização tão estreita, que hoje usamos as formas dessas peças para determinar sua cronologia. No entanto, enquanto as pastas cerâmicas podem ser moldadas a frio e endurecidas com fogo moderado, as massas vítreas precisam de temperaturas muito altas para serem moldadas e só se tornam rígidas ao esfriar. A fabricação de vidro apresentava, portanto, maiores desafios, pois exigia não apenas temperaturas muito mais altas, mas também envolvia outras complexidades operacionais. Isso explica por que a primeira aplicação do vidro foi como revestimento para peças de cerâmica, e muitos séculos se passaram antes que a vidraria se estabelecesse como uma atividade independente. (NAVARRO, J.M.F. - EL VIDRIO).

Com alguma margem de incerteza, pode-se afirmar que o vidro teve suas origens na região conhecida como Crescente Fértil, que abrange a área entre os rios Tigre e Eufrates e se estende desde a terra de Canaã ou costa mediterrânea da Síria até o Golfo Pérsico. Esse desenvolvimento ocorreu entre o final do período Neolítico e o início da Idade do Bronze, coincidente com o advento da metalurgia. Diante disto, é possível afirmar a importância do vidro para o avanço tecnológico, desta forma faz-se necessário entender o que é o vidro e seus formadores, onde encontrar, suas características e aplicações na indústria. (NAVARRO, J.M.F. - EL VIDRIO)

As fritas, esmaltes e engobes cerâmicos têm desempenhado um papel essencial na história da cerâmica, desde as civilizações antigas até os dias atuais, marcando uma jornada de inovação e impacto nas esferas social, ambiental e econômica. Ao longo dos séculos, esses revestimentos cerâmicos evoluíram significativamente em termos de formulações, técnicas de aplicação e funcionalidades, acompanhando as demandas estéticas, funcionais e sustentáveis da sociedade. (CIPRIANO, et al, 2017)

A história dos esmaltes cerâmicos remonta a civilizações antigas como os egípcios, gregos e romanos, que desenvolveram técnicas rudimentares de vitrificação para decorar e proteger artefatos cerâmicos. No entanto, foi durante a Idade Média e o Renascimento que os esmaltes cerâmicos alcançaram um patamar de refinamento, especialmente na produção de azulejos decorativos e peças de cerâmica de alto valor artístico. As técnicas de esmaltação foram aprimoradas com a introdução de novos pigmentos, como o cobalto

para obter o azul intenso característico da porcelana chinesa. (NAVARRO, J.M.F. - EL VIDRIO)

No que diz respeito aos engobes cerâmicos, sua história está intimamente ligada à necessidade de decorar e proteger peças cerâmicas desde tempos antigos. Civilizações como os mesopotâmios e os chineses utilizavam engobes à base de argila e pigmentos naturais para criar padrões e detalhes em vasos, estátuas e artefatos domésticos. Com o avanço das técnicas de fabricação de cerâmica, os engobes se tornaram mais elaborados, permitindo a criação de peças cerâmicas com efeitos visuais sofisticados e duráveis. A importância social dos esmaltes e engobes cerâmicos é multifacetada. No contexto cultural, esses revestimentos desempenharam um papel vital na expressão artística e na preservação de tradições cerâmicas ao longo dos tempos. Eles também têm contribuído para o desenvolvimento de estilos e movimentos artísticos, influenciando a estética e o design em diversas áreas da arte e decoração. (Pracidelli, 2008.)

Do ponto de vista ambiental, a evolução dos esmaltes e engobes cerâmicos tem sido marcada por esforços contínuos para desenvolver formulações mais sustentáveis e eco-friendly. A redução do uso de metais pesados e substâncias tóxicas, o aumento da eficiência energética nos processos de queima e a busca por matérias-primas renováveis são algumas das tendências que refletem o compromisso da indústria cerâmica com a preservação do meio ambiente. (GARCIA et al., 2012)

Com o passar do tempo, os recursos naturais da Terra, anteriormente vistos como inesgotáveis, foram explorados de maneira descontrolada, resultando na geração de grandes quantidades de resíduos sólidos. Essa exploração desenfreada tem levado a sérios problemas ambientais. A geração de resíduos sólidos ocorre em todos os processos de produção. Dessa forma, a reciclagem ou reutilização desses resíduos dentro do próprio processo pode ser uma estratégia eficaz para a preservação ambiental. Contudo, aumentar o valor dos subprodutos através da valorização de resíduos tem sido uma alternativa sustentável para evitar seu descarte em aterros sanitários ou como condicionadores de solo (PEREIRA et al., 2004).

A reciclagem se tornou uma prática comum em todo o mundo. No entanto, no Brasil, muitos resíduos industriais com alto potencial de reaproveitamento ainda requerem estudos específicos para o desenvolvimento de soluções adequadas para sua destinação. A utilização de uma matriz cerâmica (como cimento e vidro) tem se mostrado uma alternativa eficiente para a inertização de resíduos. Entre as várias opções, a vitrificação apresenta várias vantagens, como a incorporação de quase todos os elementos químicos

na estrutura desordenada do vidro; a independência das propriedades do vidro ou vitrocerâmica obtidos em relação às matérias-primas usadas, dependendo apenas da composição química final; a facilidade de ajuste das propriedades utilizando tecnologias conhecidas de fabricação de vidro e recursos de otimização por cristalização; a redução significativa do volume; e a capacidade das formulações vítreas de absorver facilmente mudanças nos parâmetros do processo. Uma possível desvantagem é o custo do processo, que muitas vezes é maior do que o custo da deposição. Além disso, a fabricação alternativa é muito mais limitada em comparação com o uso de materiais cerâmicos convencionais. (PEREIRA, 2006)

De maneira estratégica, a maioria dos resíduos gerados pela indústria cerâmica é reaproveitada no próprio processo produtivo. A indústria de cerâmica vermelha, por exemplo, tem utilizado grandes quantidades de resíduos de diversos setores industriais, devido à sua alta capacidade produtiva e baixa exigência técnica. Diversos estudos têm documentado a incorporação de resíduos em composições de cerâmica vermelha, como o resíduo de bauxita - lama vermelha, resíduos galvânicos, resíduos de mármore e granitos, minério de ferro e resíduos da indústria de papel (PINHEIRO et al., 2008), entre outros.

Em termos econômicos, a indústria de esmaltes e engobes cerâmicos desempenha um papel significativo em muitas economias globais e locais. Empresas especializadas nesse setor fornecem materiais essenciais para a produção de uma ampla gama de produtos cerâmicos, desde azulejos e louças sanitárias até peças decorativas e de arte. Além disso, a demanda por revestimentos cerâmicos de alta qualidade e design inovador impulsiona a inovação e a competitividade no mercado, gerando empregos e oportunidades de negócios em toda a cadeia produtiva. Em resumo, a história dos esmaltes e engobes cerâmicos é uma narrativa de criatividade, avanço tecnológico e responsabilidade ambiental e social. Esses materiais continuam a desempenhar um papel vital na indústria cerâmica e na vida cotidiana, enriquecendo espaços, preservando tradições e impulsionando o desenvolvimento sustentável em escala global. (PINHEIRO et al., 2008).

Diante dessas questões, esta pesquisa tem como objetivo desenvolver e propor soluções para a gestão e aproveitamento de resíduos cerâmicos gerados nos respectivos processos industriais. A intenção é minimizar as perdas econômicas das indústrias cerâmicas, ao mesmo tempo em que se busca garantir uma maior sustentabilidade socioeconômica para as empresas e um impacto ambiental reduzido.

## 1. OBJETIVOS

### 2.1 Objetivo geral:

Este trabalho tem como objetivo desenvolver formulações de engobes com a substituição parcial de frita cerâmica por vidros reciclados.

### 2.2 Objetivos Específicos:

- Realizar uma classificação detalhada de diferentes tipos de fritas e revestimentos cerâmicos utilizados na indústria, considerando as variações de suas composições químicas, processos específicos de fabricação e as diversas aplicações para os quais são desenvolvidos.
- Analisar as características e propriedades das fritas cerâmicas examinando-as, com base em estudos prévios, para entender seu desempenho em diferentes aplicações na indústria cerâmica.
- Investigar o uso de vidros reciclados, tanto CRT quanto vidro plano, em associação com caulim, avaliando a viabilidade técnica e o desempenho funcional e estético dessas composições a partir de uma análise inicial de suas propriedades e características.
- Analisar a viabilidade técnica e econômica da substituição parcial de fritas por vidros reciclados em formulações de engobes cerâmicos, avaliando as propriedades estéticas e funcionais dos revestimentos resultantes, bem como os impactos ambientais e econômicos associados a essa substituição.
- Estudar a formulação e aplicação de revestimentos cerâmicos com incorporação de vidros reciclados, através de uma revisão bibliográfica e uma aplicação prática, avaliando suas propriedades estéticas, funcionais e de durabilidade para aplicações industriais.

### **3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

#### **3.1 Definição e características dos principais tipos de cerâmicas e fritas utilizadas na indústria.**

##### **3.1.1 Cerâmicas**

As cerâmicas são materiais inorgânicos, não metálicos, que passam por um processo de conformação e subsequente sinterização (queima) a altas temperaturas. Suas propriedades variam amplamente dependendo da composição e do processo de fabricação, mas elas compartilham características comuns, como alta dureza, resistência ao desgaste, baixa condutividade térmica e elétrica, e boa estabilidade química.

O processo de fabricação de pisos e azulejos cerâmicos, que é altamente eficiente e complexo. Essa cadeia abrange desde a seleção das matérias-primas até a entrega final do produto ao mercado, garantindo qualidade e competitividade no setor. na figura 1 podemos observar a cadeia produtiva.

##### **3.1.2 Seleção e Preparação das Matérias-Primas**

O processo produtivo se inicia com a escolha de matérias-primas como argilas, feldspatos, caulins e quartzo. Esses componentes são responsáveis por definir as propriedades físicas e mecânicas dos pisos e azulejos. Após a seleção, as matérias-primas passam por processos de moagem e homogeneização, que garantem uniformidade na mistura e proporcionam uma massa fina e adequada para a prensagem.

##### **3.1.3 Formação das Peças**

A etapa de conformação se dá principalmente por prensagem a seco. Nessa fase, a massa cerâmica é compactada em moldes sob alta pressão, formando as placas que serão os pisos ou azulejos. Esse processo assegura a resistência e a uniformidade das peças, permitindo uma fabricação eficiente e de qualidade controlada.

##### **3.1.4 Secagem**

Após a conformação, as peças passam por um processo de secagem controlada, que reduz a umidade remanescente. Esse passo é essencial para evitar problemas durante a

queima, como deformações ou rachaduras, assegurando que o produto mantenha suas propriedades físicas intactas.

### 3.1.5 Aplicação de Engobe e Esmalte

Antes de serem queimadas, as peças cerâmicas recebem uma aplicação de engobe, um tipo de revestimento que uniformiza a superfície e facilita a aderência do esmalte. Em seguida, é aplicada uma camada de esmalte cerâmico, que define a cor, o brilho e a textura do produto final. Dependendo do design, podem ser adicionadas também decorações específicas para criar padrões visuais.

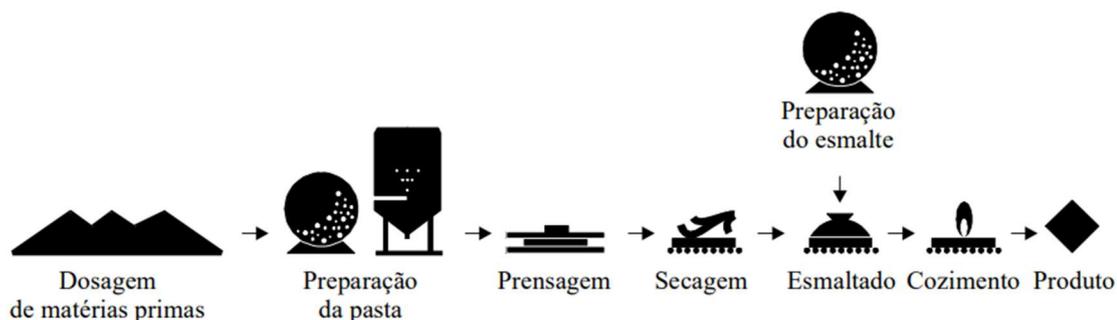
### 3.1.6 Queima

A queima das peças ocorre em fornos que podem alcançar até 1200°C, uma etapa essencial para transformar a matéria-prima em um produto cerâmico acabado. Durante a queima, ocorre a fusão dos componentes, formando uma estrutura rígida e durável. Este processo confere ao piso ou azulejo alta resistência mecânica, impermeabilidade e um acabamento vitrificado de qualidade.

### 3.1.7 Resfriamento e Controle de Qualidade

Após a queima, o resfriamento controlado das peças é crucial para evitar fissuras e tensões internas. Em seguida, todas as peças passam por inspeção rigorosa para garantir que atendam às exigências de qualidade em termos de aparência e dimensões. Apenas produtos que estejam em conformidade são aprovados para a fase de embalagem.

**Figura 1** - Diagrama do processo de fabricação de pisos e azulejos cerâmicos



Fonte: Sánches, 1997

## 3.2 As principais categorias de cerâmicas na indústria

### 3.2.1 Cerâmica Vermelha

**Definição:** Feita a partir de argilas comuns, é utilizada para a fabricação de tijolos, telhas e outros materiais de construção.

**Características:** Tem boa resistência mecânica, é porosa e possui um baixo custo de produção.

### 3.2.2 Cerâmica Branca

**Definição:** Produzida a partir de matérias-primas puras, como o caulim, é utilizada em produtos como louças sanitárias e revestimentos.

**Características:** Alta resistência mecânica, baixa porosidade, e coloração clara devido à pureza das matérias-primas.

### 3.2.3 Refratários

**Definição:** Cerâmicas projetadas para suportar temperaturas extremas sem perder suas propriedades físicas.

**Características:** Elevada resistência térmica, baixa condutividade térmica, e alta durabilidade.

### 3.2.4 Cerâmicas Avançadas

**Definição:** Desenvolvidas para aplicações tecnológicas e industriais de alta performance, como em eletrônica, biomateriais e aeroespacial.

**Características:** Alta resistência ao calor, excelente resistência ao desgaste, propriedades elétricas e térmicas controladas, e durabilidade excepcional.

## 3.3 Fritas.

A produção de fritas cerâmicas é um processo crucial na indústria de revestimentos, onde materiais vítreos são fundidos em altas temperaturas para criar a base dos vidrados utilizados em peças cerâmicas. Essas fritas, obtidas a partir de matérias-primas cristalinas, são resfriadas rapidamente para formar o componente essencial que garante a qualidade e

durabilidade dos produtos finais. (CASAGRANDE, M. C, 2008, p. 34-42). As fritas são materiais vítreos obtidos pela fusão de várias matérias-primas, que são posteriormente resfriadas e moídas em um pó fino. São amplamente utilizadas na fabricação de esmaltes cerâmicos, engobes e outros revestimentos. Elas desempenham um papel crucial no controle das propriedades finais desses revestimentos, como brilho, dureza e adesão.

No Brasil, as fritas são os principais produtos da indústria de coloríficos. Elas podem ser comercializadas em sua forma pura ou combinadas com outras matérias-primas, tanto naturais quanto sintéticas, para formar composições de engobes, esmaltes, granilhas e tintas serigráficas. Em 2010, a indústria de coloríficos produziu cerca de 500 mil toneladas de fritas. O país conta com aproximadamente 17 empresas produtoras de fritas, concentradas principalmente nos dois grandes polos cerâmicos localizados no interior de São Paulo (região de Santa Gertrudes) e no interior de Santa Catarina (região de Criciúma). O crescimento da indústria de coloríficos está diretamente relacionado à indústria de revestimentos cerâmicos, que é a maior consumidora de fritas e seus derivados. (ZANATA e NANDI, 2014, p1)

As fritas cerâmicas, de natureza vítrea, são obtidas por meio de fusão em temperaturas elevadas (em torno de 1500 °C), resultantes da combinação de matérias-primas minerais (como quartzo, feldspatos e caulins) e químicas (como boratos e carbonatos). Essas fritas proporcionam flexibilidade no uso de matérias-primas na produção cerâmica, ampliam o intervalo de queima dos esmaltes, melhoram a uniformidade do vidrado, diminuem a ocorrência de defeitos superficiais provenientes do corpo cerâmico e conferem ao produto final uma superfície mais lisa, brilhante e impermeável. (Zanata e Nandi, 2014, p1). Os principais tipos de fritas incluem:

### **3.3.1 Fritas Alcalinas** (*Fritas Transparentes*)

**Descrição:** Usadas para produzir esmaltes transparentes de alto brilho. Essas fritas são muito utilizadas para revestir superfícies onde se deseja uma boa visibilidade do substrato cerâmico subjacente, como em louças e azulejos.

### **3.3.2 Fritas Borácicas** (*Fritas de Baixa Fusão*)

**Descrição:** São utilizadas para baixar a temperatura de fusão dos esmaltes. Essas fritas são essenciais na produção de esmaltes que precisam vitrificar a temperaturas mais baixas, como aqueles usados em cerâmicas de baixa queima ou em decorações que exigem

cores mais vívidas.

### **3.3.3 Fritas Zinco-Alcalinas** (*Fritas Opacas*)

**Descrição:** Utilizadas para criar esmaltes opacos que escondem completamente o substrato cerâmico. Essas fritas são comuns em revestimentos onde a opacidade é desejada, como em azulejos decorativos e sanitários.

### **3.3.4 Fritas Plumbíferas** (*Fritas de Brilho Elevado* ou *Fritas de Chumbo*)

**Descrição:** São utilizadas para obter esmaltes com brilho excepcional e excelente fusibilidade. Devido a questões ambientais e de saúde, o uso dessas fritas tem sido reduzido e substituído por alternativas mais seguras, mas ainda são referenciadas em contextos históricos ou específicos.

### **3.3.5 Fritas Mate** (*Fritas para Esmaltes Foscos*)

**Descrição:** Embora não mencionadas anteriormente, essas fritas são desenvolvidas para produzir esmaltes com acabamento fosco. Elas são usadas em aplicações onde um acabamento sem brilho é desejado, como em revestimentos modernos e designs arquitetônicos.

### **3.3.6 Fritas Brancas** (*Fritas Opacificantes*)

**Descrição:** Similar às fritas zinco-alcálicas, são utilizadas para criar esmaltes opacos, mas especificamente para fornecer uma base branca sólida, usada frequentemente em cerâmica branca como louças sanitárias e pisos.

## **3.4 Processo de fabricação das fritas**

### **3.4.1 Objetivo da Fritagem**

A fritagem tem como propósito principal transformar os componentes solúveis em água, presentes nas matérias-primas, em um vidro insolúvel, por meio da fusão com outros elementos. Esse processo é fundamental para garantir que o material resultante seja homogêneo e insolúvel, características indispensáveis para a aplicação em recobrimentos cerâmicos.

### 3.4.2 Vantagens da Fritagem

**Homogeneidade de Composição:** Ao submeter as matérias-primas à fritagem, estas fundem e amadurecem a temperaturas e tempos de queima menores em comparação às matérias-primas não fritadas, resultando em uma superfície vidrada mais lisa e brilhante.

**Redução da Temperatura e Tempo de Queima:** A fritagem permite a criação de esmaltes com maiores quantidades de óxidos, como o dióxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ) e o óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), melhorando as propriedades mecânicas e químicas dos esmaltes. Além disso, a frita possibilita a queima dos vidrados em temperaturas mais baixas, acelerando o processo e economizando energia.

**Melhora na Estabilidade das Suspensões:** As matérias-primas utilizadas em vidrados possuem partículas com tamanhos e densidades muito variados, o que pode levar à sedimentação e segregação nas suspensões. O processo de fritagem reduz significativamente essa tendência, proporcionando uma melhor uniformidade nas formulações.

### 4.4.3 Preparação das Matérias-Primas

As matérias-primas, em forma de pó, são cuidadosamente pesadas de maneira gravimétrica para garantir a precisão da formulação.

Em seguida, essas matérias-primas são transportadas por arraste pneumático até um misturador, que, em questão de minutos, realiza uma mistura homogênea de todos os componentes.

### 3.4.4 Fusão das Matérias-Primas no Forno

A mistura resultante é então armazenada em um silo de alimentação e alimentada continuamente em um forno de fusão, que opera a temperaturas extremamente elevadas, em torno de  $1500\text{ }^\circ\text{C}$ . A mistura é introduzida no forno através de uma rosca sem fim, o que permite uma alimentação contínua e controlada.

À medida que a mistura de matérias-primas entra no forno, inicia-se o processo de decomposição dos componentes, liberando gases e promovendo a formação de fases líquidas. Isso permite que os materiais mais fundentes comecem a reagir e dissolver os componentes refratários, como o quartzo, a alumina e o silicato de zircônia.

A fusão parcial de alguns componentes também facilita o deslizamento contínuo da camada superficial da pilha de material dentro do forno, promovendo a eficiência do processo de fusão.

### **3.4.5 Processo Completo de Fusão e Resfriamento**

Durante a permanência no interior do forno, todas as reações e transformações químicas precisam ser finalizadas para garantir uma frita de qualidade. Ao final desse processo, a frita atinge o estado de fusão ideal, e o material é rapidamente resfriado.

Esse resfriamento brusco ocorre despejando a frita fundida sobre água ou através de rolos refrigerados por água, o que promove a solidificação rápida do material, mantendo suas propriedades desejadas.

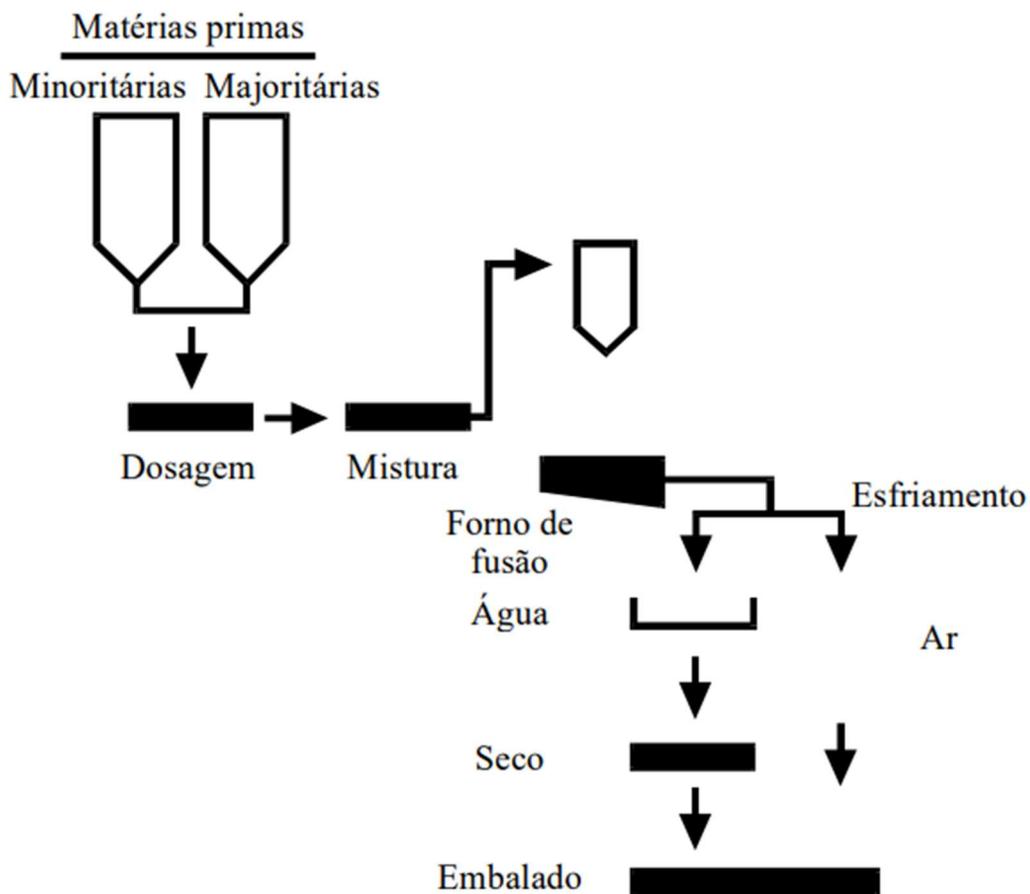
### **3.4.6 Automatização do Processo**

A modernização da produção de fritas cerâmicas trouxe a incorporação de fornos contínuos de carros, um avanço tecnológico que permitiu o desenvolvimento de um processo de fabricação contínuo e automatizado. Essa mudança não só aumentou a eficiência da produção, como também garantiu maior controle de qualidade, uniformidade e redução de custos energéticos, contribuindo significativamente para a competitividade da indústria cerâmica.

Este processo complexo, que envolve temperaturas elevadas e controles rigorosos, é essencial para garantir a produção de fritas cerâmicas de alta qualidade, que são fundamentais para a obtenção de revestimentos e vidrados cerâmicos com as características desejadas de durabilidade, brilho e resistência.

Esse processo pode ser simplificado na figura 2.

**Figura 2** - Diagrama do processo de fabricação de fritas



Fonte: E. Sánches, 1997.

### 3.5 Revestimentos cerâmicos.

#### 3.5.1 Engobe

O engobe cerâmico é uma cobertura aplicada sobre o corpo cerâmico cru ou já queimado, com o objetivo de modificar a textura, a cor e as características superficiais da peça. Sua composição é bastante variada, incluindo uma mistura de argilas, caulins, materiais não plásticos como quartzo, feldspatos e sienitos, além de fritas fundentes. Em alguns casos, podem ser adicionados corantes cerâmicos para proporcionar diferentes tonalidades e acabamentos, conforme as necessidades estéticas e funcionais da peça cerâmica. (Pracidelli, 2008.)

A função principal do engobe é preparar a superfície do corpo cerâmico para receber o esmalte final, criando uma camada intermediária que melhora a aderência e a uniformidade da aplicação. Além disso, o engobe pode ser utilizado para corrigir imperfeições no corpo

cerâmico, como variações na cor ou na textura, que podem ocorrer durante a modelagem ou a primeira queima. Ao aplicar o engobe, a peça cerâmica ganha uma superfície mais homogênea, pronta para receber o esmalte ou para ser finalizada diretamente, caso o engobe seja a camada externa final. (Pracidelli, 2008.)

Uma das características do engobe é sua flexibilidade de composição, o que permite ajustá-lo de acordo com o tipo de peça cerâmica e o efeito visual desejado. Os materiais plásticos, como argilas e caulins, são responsáveis por proporcionar maleabilidade e aderência, enquanto os materiais não plásticos, como quartzo e feldspato, contribuem para a resistência e estabilidade térmica da camada de engobe durante o processo de queima. As fritas fundentes, por sua vez, são essenciais para garantir que o engobe atinja a fusão adequada durante a queima, promovendo a formação de uma superfície lisa e uniforme. (Pracidelli, 2008.)

Além de preparar a superfície para o esmalte, o engobe cerâmico pode ser utilizado de forma independente para criar efeitos estéticos, como acabamentos foscos, texturizados ou coloridos. Quando aplicado diretamente como acabamento final, o engobe pode conferir uma aparência mais rústica ou artesanal à peça, bastante valorizada em determinados estilos decorativos. (Pracidelli, 2008.)

O engobe cerâmico tem uma função significativa na proteção das peças cerâmicas contra fatores externos, como a água, a umidade e os agentes químicos. Essa característica é fundamental em cerâmicas utilitárias e revestimentos, que frequentemente ficam expostos a ambientes úmidos ou a produtos químicos. A proteção conferida pelo engobe se deve à sua composição e ao comportamento durante a queima, resultando em uma camada que aumenta a impermeabilidade e a resistência química das peças. Na literatura, o engobe é descrito como uma barreira eficaz contra a penetração de líquidos devido à sua composição, que inclui materiais como argilas e caulins, conhecidos pela sua capacidade de formar uma camada densa e menos porosa. Essa propriedade é especialmente útil para peças que precisam ter resistência à infiltração de água, como ladrilhos cerâmicos, telhas e objetos utilitários. Segundo estudos, o engobe, ao ser aplicado antes da queima, forma uma camada de transição entre o corpo cerâmico e o esmalte, reduzindo a permeabilidade do material. (Pracidelli, 2008.)

Além disso, o engobe auxilia na resistência à umidade, que é uma preocupação em

ambientes como cozinhas e banheiros, onde revestimentos cerâmicos estão frequentemente expostos à água. A adição de materiais fundentes, como as fritas, no engobe promove uma fusão parcial da camada durante a queima, resultando em uma superfície mais homogênea e menos propensa a absorver água. De acordo com estudos de engenharia cerâmica, a presença de feldspatos e quartzo na composição do engobe contribui para a estabilidade térmica e a diminuição da porosidade, limitando o efeito negativo da umidade no corpo cerâmico. No que tange à resistência a agentes químicos, o engobe também desempenha um papel relevante. Quando aplicado em peças que estarão expostas a produtos de limpeza ou substâncias químicas agressivas, como ácidos e álcalis, o engobe age como uma camada protetora que impede que esses agentes alcancem o corpo cerâmico. O quartzo e as fritas alcalinas presentes na composição do engobe melhoram a resistência química, criando uma barreira física que dificulta a degradação do material cerâmico. Isso é particularmente importante em cerâmicas de revestimento usadas em áreas industriais, cozinhas e laboratórios. (Pracidelli, 2008.)

Portanto, o engobe cerâmico não só melhora a estética e a uniformidade das peças, mas também proporciona uma camada protetora crucial contra água, umidade e agentes químicos, garantindo maior durabilidade e funcionalidade, especialmente em ambientes adversos.

### **3.5.2 Esmalte**

O esmalte cerâmico é uma cobertura aplicada à superfície de peças cerâmicas, cuja principal função é formar uma camada vítrea após o processo de queima. Essa camada é composta por uma mistura de materiais, como fritas, óxidos metálicos e outros componentes que, ao serem submetidos a altas temperaturas, se fundem para formar uma superfície rígida e brilhante. Além de sua importância estética, o esmalte cerâmico confere propriedades mecânicas, elétricas e térmicas que aumentam a durabilidade e a funcionalidade das peças cerâmicas em diversas aplicações. (Pracidelli, 2008.)

No que se refere às propriedades mecânicas, o esmalte cerâmico é um material que aumenta significativamente a resistência ao desgaste e à abrasão das peças. A sua composição vítrea cria uma superfície dura que protege a cerâmica contra arranhões, impactos e outras formas de degradação mecânica, o que é particularmente importante em pisos, azulejos e utensílios de uso diário. A rigidez conferida pela camada de esmalte é resultado da fusão de

fritas e óxidos, como o de alumínio, que proporcionam uma camada uniforme e resistente, melhorando a longevidade das peças cerâmicas mesmo em condições de uso intensivo. Em termos de propriedades elétricas, o esmalte cerâmico funciona como um excelente isolante elétrico, devido à sua natureza vítrea. A estrutura amorfa do esmalte impede a condução de corrente elétrica, o que o torna ideal para uso em componentes elétricos e eletrônicos. Esmaltes com elevado teor de óxidos de silício e alumínio são frequentemente aplicados em isoladores elétricos, protegendo os sistemas e equipamentos contra descargas elétricas e aumentando a segurança em instalações elétricas. Essas propriedades tornam o esmalte cerâmico uma escolha eficaz para aplicações industriais onde o isolamento elétrico é crucial. (Pracidelli, 2008.)

A composição química do esmalte também confere uma série de propriedades térmicas que são importantes em aplicações que envolvem variações de temperatura. O esmalte cerâmico é capaz de suportar altas temperaturas sem sofrer deformações ou rachaduras, graças à presença de materiais como os óxidos de alumínio e silicatos. Isso permite que peças esmaltadas sejam utilizadas em utensílios de cozinha, fornos industriais e outros ambientes com exposição térmica intensa. Além disso, a resistência térmica do esmalte contribui para a estabilidade da peça cerâmica em ciclos de aquecimento e resfriamento, evitando danos causados pela expansão e contração térmica. (Pracidelli, 2008.)

Do ponto de vista químico, o esmalte é composto por uma mistura de materiais cuidadosamente balanceados. As fritas, que são misturas pré-fundidas de vários componentes, atuam como fluxos, facilitando a fusão do esmalte durante a queima e proporcionando a formação de uma camada vítrea uniforme. Os óxidos metálicos, como o de zinco, titânio e cobalto, desempenham um papel fundamental tanto na resistência mecânica quanto na estabilidade química do esmalte, além de influenciar aspectos como a cor e o brilho. A sílica, presente em altas concentrações, é essencial para a vitrificação do esmalte, criando uma estrutura amorfa que confere dureza e estabilidade. (Pracidelli, 2008.)

## 4 METODOLOGIA

Este trabalho foi realizado no laboratório de controle de qualidade da empresa Esmalglass-Itaca, localizada no Polo cloroquímico de Marechal Deodoro, e consiste em duas etapas principais: Revisão Bibliográfica e Experimentação.

A revisão teórica embasará a fase experimental, onde serão desenvolvidas formulações de revestimentos cerâmicos, focando na incorporação de vidros reciclados como matéria-prima.

A primeira etapa consistirá no levantamento e análise de estudos e pesquisas que abordam o uso de rejeitos em fritas e revestimentos cerâmicos. Será realizada uma busca sistemática nas principais bases de dados científicas, como ScienceDirect, Scopus e Cerâmica Industrial, que é uma revista do técnico cerâmico brasileiro, utilizando palavras-chave relacionadas ao tema, tais como "rejeitos cerâmicos", "fritas", "reciclagem de resíduos" e "revestimentos cerâmicos sustentáveis". Esta revisão buscará identificar:

- Principais tipos de rejeitos utilizados na produção de fritas e revestimentos cerâmicos;
- Estudos de caso e resultados de pesquisas já realizadas, com foco nas propriedades físicas e químicas dos produtos resultantes;
- Tipos de rejeitos industriais mais comuns utilizados na formulação de esmaltes e engobes;
- Uso de vidros reciclados como matérias-primas para esmaltes e engobes.

A revisão permitirá definir as diretrizes para o desenvolvimento das formulações experimentais, além de identificar metodologias adequadas para a caracterização dos produtos.

A segunda etapa será dedicada à experimentação com a incorporação de vidros reciclados de eletrônicos e vidros planos de janelas nas formulações de engobes. Esta fase será dividida em etapas específicas, que será abordado no tópico seguinte.

### 4.1 Seleção dos Materiais

Para esta etapa, serão selecionados dois tipos de vidros reciclados:

**Vidros de eletrônicos:** Resíduos provenientes de telas de dispositivos eletrônicos,

como monitores de computadores, televisores e smartphones. Esses vidros contêm óxidos alcalinos e de chumbo que podem ser úteis na formulação de engobes. O material pode ser obtido a partir de centros de reciclagem de eletrônicos ou empresas especializadas no descarte e reaproveitamento de resíduos eletrônicos.

**Vidros planos de janelas:** Provenientes da reciclagem de vidros planos utilizados em janelas de prédios e residências. Este tipo de vidro é amplamente disponível em empresas de reciclagem de construção civil e em pontos de coleta seletiva. O vidro plano é rico em óxidos de silício e sódio, o que contribui para a formação de engobes de boa qualidade.

Esses materiais serão processados em laboratório, triturados e moídos até atingirem uma granulometria adequada para sua incorporação nas formulações cerâmicas. A reciclagem desses vidros não só contribui para a sustentabilidade, mas também permite substituir parcialmente matérias-primas naturais.

## 4.2 Materiais utilizados

**Tabela 1** – Materiais utilizados

<b>Materiais</b>	<b>Equipamentos</b>
Vidro de tubo de raios catódicos	Balança analítica
Vidro plano de janelas	Balança semi-analítica
Caulim	Moinho de bolas
Argila	Jarro cerâmico
Dióxido de titânio	Bolas de alumina
Dolomita	Trinil 0,5 mm
Talco	Binil 0,5 mm
Quartzo	Binil 0,3 mm
Feldspato	Espátula
Hexametáfosfato	Proveta de 100 ml
CarboCel	colher de alumínio

Fonte: Autor, 2024.

### 4.3 Tubos de raios catódicos

O descarte de tubos de raios catódicos (CRT) provenientes de computadores pessoais e televisores fora de uso representa um dos principais desafios no gerenciamento de resíduos eletrônicos, devido à sua composição complexa e às dificuldades associadas à reciclagem. Como esses dispositivos são formados por diferentes materiais, encontrar uma aplicação adequada para cada parte do monitor é crucial para uma solução eficiente e sustentável. O painel de vidro do CRT, em particular, é um vidro silicato com uma quantidade significativa de óxidos alcalinos e alcalino-terrosos, o que confere características que tornam sua reciclagem uma tarefa promissora. Uma das alternativas mais viáveis é a substituição da frita por esse vidro reciclado na formulação de esmaltes cerâmicos, o que não só possibilita o reaproveitamento de resíduos eletrônicos, mas também contribui para a redução do uso de matérias-primas tradicionais. Essa abordagem oferece benefícios tanto do ponto de vista ambiental quanto econômico, tornando-se uma solução interessante para a indústria cerâmica e para o enfrentamento do crescente acúmulo de resíduos eletrônicos. (REVELO et, al., 2018.)

Um tubo de raios catódicos (CRT) é formado por três tipos principais de vidro, distribuídos em cerca de 66% em peso no painel frontal, 33% no funil e 1% no gargalo, o que corresponde a aproximadamente 80% do peso total de um monitor de TV ou computador. Entre esses componentes, o vidro do painel se destaca por conter a maior quantidade de óxidos alcalinos e alcalino-terrosos, o que o torna particularmente adequado para reaproveitamento na substituição da frita na formulação de esmaltes cerâmicos. A inclusão desse vidro reciclado nas composições de esmaltes cerâmicos oferece uma série de vantagens, como a diminuição da dependência de fontes naturais de matérias-primas e a redução do consumo energético no processo de produção. Além disso, o uso do vidro CRT reciclado pode otimizar o tempo de produção, tornando o processo mais eficiente e sustentável. Essa estratégia não só promove uma destinação mais adequada para o resíduo eletrônico, como também traz benefícios econômicos e ambientais, ao integrar soluções inovadoras e sustentáveis para a indústria cerâmica. (REVELO et, al., 2018.).

Revelo et al. testou a substituição de uma frita transparente comercial por vidro de painel CRT na formulação de um esmalte cerâmico padrão para revestimentos cerâmicos utilizando condições de monoqueima rápida semelhantes às de um processo industrial, visando valorizar a reciclagem de resíduos de vidro CRT. Neste trabalho iremos testar a

substituição de 5% e 10% de uma fritada opaca, por resíduos de vidro CRT na produção de um engobe cerâmico.

#### **4.4 Vidro plano**

Os vidros planos são materiais amplamente utilizados em diversos setores da indústria, como a construção civil, a produção automotiva e a fabricação de espelhos. Esses vidros, fabricados em chapas, possuem como principal característica sua composição sodocálcica, composta majoritariamente por sílica (70 a 72%) na forma de areia, que atua como vitrificante. Outros componentes importantes são o carbonato e o sulfato de sódio, que funcionam como fundentes, representando cerca de 14% da composição, além do óxido de cálcio, proveniente do calcário, que age como estabilizante, perfazendo aproximadamente 10%. Além desses, outros óxidos, como os de alumínio e magnésio, são adicionados para aumentar a resistência do vidro contra agentes atmosféricos. (CIPRIANO, et al, 2017)

O processo de fabricação dos vidros planos envolve três etapas principais: a preparação da mistura, a fusão e a conformação. Na fase de preparação, os materiais são cuidadosamente dosados e misturados, garantindo que as proporções corretas sejam mantidas para a obtenção das propriedades desejadas. Em seguida, a mistura passa pela fusão, geralmente em fornos de alta temperatura, onde os materiais são transformados em uma massa homogênea. Por fim, essa massa fundida é conformada em chapas que podem ser utilizadas em diferentes aplicações. (CIPRIANO, et al, 2017)

Recentemente, estudos têm investigado o potencial do vidro plano reciclado na fabricação de revestimentos cerâmicos, particularmente em formulações de esmaltes e engobes. A utilização de vidro plano em revestimentos cerâmicos oferece uma alternativa sustentável e econômica, visto que os componentes presentes em sua composição, como sílica e óxidos de cálcio e sódio, são comuns em formulações cerâmicas tradicionais. Ao integrar vidros planos reciclados na produção de revestimentos, é possível não apenas reduzir o consumo de matérias-primas naturais, como também otimizar as propriedades físicas e químicas dos esmaltes, melhorando aspectos como a resistência e a durabilidade. (CIPRIANO, et al, 2017)

Dessa forma, a aplicação de vidros planos reciclados em revestimentos cerâmicos não só proporciona um destino sustentável para os resíduos dessa indústria, mas também possibilita a inovação no setor cerâmico, conferindo aos produtos finais características

superiores em termos de qualidade e desempenho. (CIPRIANO, et al, 2017)

#### **4.5 Procedimento experimental**

Para o desenvolvimento das formulações dos engobes, foram selecionadas matérias-primas típicas da indústria cerâmica, como a frita, a argila e o quartzo, dentre outros materiais conforme tabela 1, todas fornecidas pela empresa Esmalglass-Itaca, reconhecida por sua expertise no setor. Além disso, o vidro plano e o vidro CRT, escolhido como substituto da frita nas composições, também foi obtido da mesma empresa, demonstrando a versatilidade e abrangência de seus produtos. Os suportes utilizados nos experimentos, ou corpos de prova, foram igualmente disponibilizados pela Esmalglass-Itaca, garantindo que todo o material necessário para a execução dos testes laboratoriais viesse de uma única fonte, facilitando o controle de qualidade e a padronização das amostras.

##### **4.5.1 Análise química dos vidros reciclados**

Durante o desenvolvimento deste trabalho, foi realizada uma análise química detalhada dos vidros reciclados utilizando a técnica de fluorescência de raios X (FRX). Essa análise foi fundamental para caracterizar a composição elementar dos vidros reciclados, provenientes de tubos de raios catódicos (CRT) e vidros planos, os quais seriam posteriormente incorporados nas formulações de engobes cerâmicos. A análise química é um passo essencial, pois permite verificar a presença e a concentração de óxidos essenciais ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , etc.), além de detectar possíveis contaminantes que poderiam comprometer o desempenho da formulação cerâmica e afetar a qualidade do produto final.

As amostras foram enviadas para esmalglass-Itaca localizada no Sul do Brasil, em Santa Catarina, onde foi possível a realização da análise química. as amostras foram analisadas pelo seguinte método:

##### **4.5.2 Procedimento experimental da análise química**

Inicialmente é feita a preparação das amostras, pesando o fundente metaborato de lítio 7g, juntamente com a amostra 0,7g, previamente moída. Em seguida, a mistura fundente + amostra, é transferida para um cadinho de platina, sendo levado para uma máquina de fusão a  $1100^\circ\text{C}$ , onde a mistura será fundida, ocorrendo total homogeneização dos materiais. Na sequência, o material ainda líquido é transferido para um molde de platina, onde será gerado

uma pérola que será utilizada para análise química.

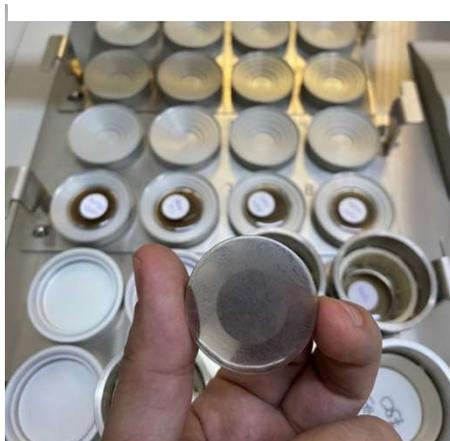
**Figura 3** - Máquina de fusão.



Fonte: Autor, 2024.

Com a pérola fundida pronta, ela é inserida no espectrômetro de FRX. Quando a radiação de raios X interage com os átomos na pérola, são gerados raios X secundários (fluorescentes) característicos dos elementos presentes na amostra. A análise gera um espectro que identifica e quantifica os elementos químicos presentes com alta precisão.

**Figura 4** - Perola para análise FRX.



Fonte: Autor, 2024.

**Figura 5** - Espectrômetro de FRX.



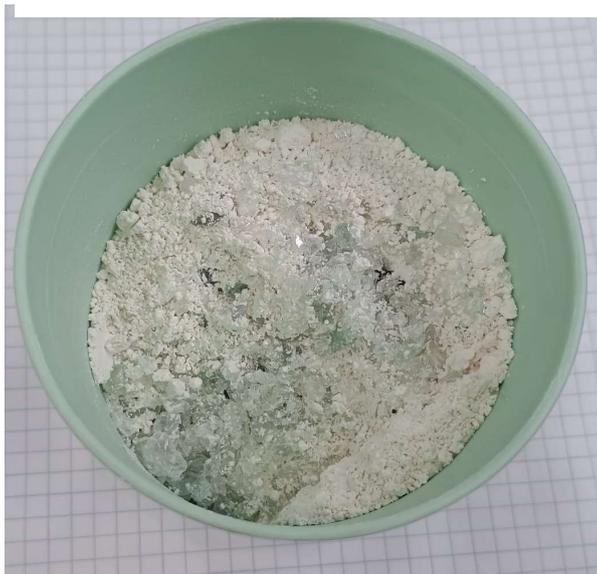
Fonte: Autor, 2024.

### 4.5.3 Planejamento das formulações

O ponto de partida para as composições se deu a partir da composição padrão, realizada apenas com o material a controlar (vidros reciclados) e caulim, para avaliar as condições dos mesmos como matéria prima para composição dos engobes.

A composição foi da seguinte forma: 90% do vidro reciclado e 10% de caulim. Essa formulação foi feita para os dois materiais, vidro CRT e vidro plano. A pesagem foi realizada em uma balança semi-analítica, em um copo de plástico, ficando da seguinte forma, conforme imagem 1.

**Figura 6** - Vidro reciclado mais caulim.



Fonte: Autor, 2024.

**Figura 7** - Amostras moídas.



Fonte: Autor, 2024.

#### **4.5.4 Formulação dos Engobes**

Foram preparadas quatro formulações de engobes utilizando os vidros reciclados de eletrônicos e janelas como parte das matérias-primas. Outras matérias-primas tradicionais

como argilas, caulins e feldspatos também serão adicionadas, garantindo a plasticidade e aderência do engobe ao corpo cerâmico cru.

O ponto de partida para o desenvolvimento das composições baseou-se em uma formulação padrão (STD) de engobe cerâmico. A partir dessa formulação inicial, foram elaboradas outras quatro composições experimentais. As formulações foram identificadas como, P1, P2, P3 e P4, onde "STD" refere-se à composição padrão, e as designações "P1", "P2", "P3" e "P4" representam as novas variações introduzidas. A Tabela 2 detalha os percentuais dos componentes utilizados em cada formulação.

Nas composições F1 e F2, o vidro proveniente de tubos de raios catódicos (CRT) foi incorporado em proporções de 5% e 10%, respectivamente. Já nas formulações F3 e F4, foi utilizado vidro plano em proporções também de 5% e 10%. Essas variações foram feitas com o objetivo de avaliar o impacto da substituição parcial da frita opaca por diferentes tipos de vidro reciclado (CRT e vidro plano) nas propriedades finais do engobe cerâmico, assim como também na redução de custos.

**Tabela 1**–Formulas dos engobes

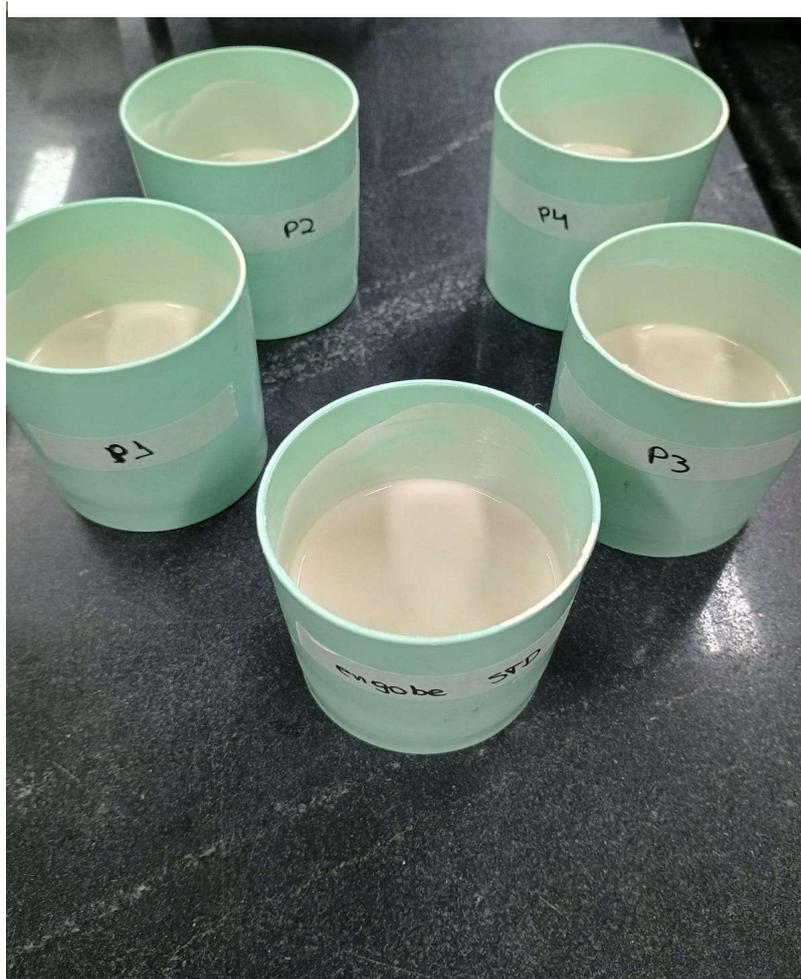
Produto	STD %	F1 %	F2 %	F3 %	F4 %
Frita opaca	42	37	32	37	32
Vidro CRT	0	5	10	0	0
Vidro plano	0	0	0	5	10
Argila	12,7	12,7	12,7	12,7	12,7
Dioxido de titanio	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
Dolomita	8	8	8	8	8
Talco	11	11	11	11	11
Quartzo	14	14	14	14	14
Feldspato	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5
Hexametafosfato	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
<u>Carbocel</u>	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05

Fonte: Autor, 2024.

#### 4.5.5 Processamento das formulações

As composições foram submetidas a um processo de moagem utilizando um moinho laboratorial do tipo "periquito", previamente calibrado para garantir a precisão do procedimento. O moinho utilizado tem capacidade de 1 litro e foi carregado com 750 gramas de esferas de alta alumina, variando entre 13 e 23 milímetros de diâmetro. Esse processo foi cuidadosamente controlado para assegurar a homogeneização adequada das misturas.

**Figura 8** - Formulas dos engobes moídas.



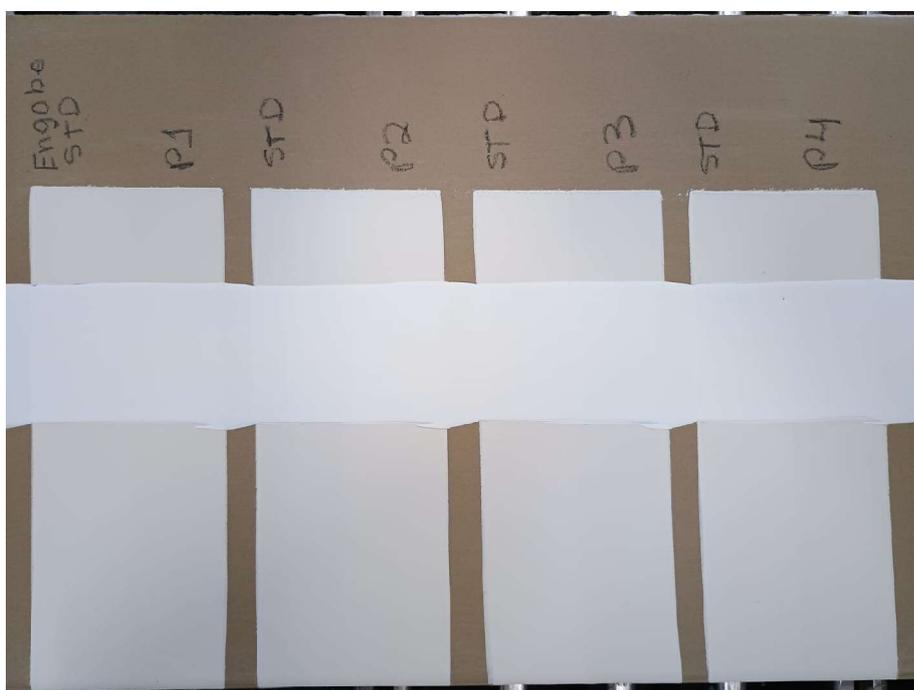
Fonte: Autor, 2024.

O tempo de moagem foi estabelecido em 13 minutos, baseado em estudos prévios que indicam ser esse período o suficiente para alcançar a distribuição granulométrica desejada. Após a moagem, o material resultante foi transferido para copos previamente identificados, para dar continuidade no processo, sendo a aplicação em base cerâmica.

#### 4.5.6 Aplicação dos engobes

Para a aplicação das formulações desenvolvidas, foi usado bases cerâmicas produzidas por meio do processo de via seca, com dimensões de 30 cm x 60 cm. Essas bases apresentam características adequadas para avaliar a aderência e o desempenho das composições testadas. Os engobes foram aplicados utilizando um binil com abertura de 0,3 mm. Em seguida, procedeu-se à aplicação de um esmalte transparente sobre o engobe já depositado, utilizando-se um segundo binil, desta vez com abertura de 0,5 mm, a fim de assegurar uma cobertura mais espessa e homogênea conforme é possível observar na **imagem 3**. Esse procedimento foi repetido de forma padronizada para todas as amostras, com o intuito de garantir a consistência dos resultados nos ensaios subsequentes de queima e análise de acabamento superficial. A metodologia adotada foi planejada para possibilitar a avaliação precisa das propriedades estéticas e funcionais de cada formulação testada, essencial para a análise final dos materiais cerâmicos desenvolvidos

**Figura 9** - Aplicação dos engobes em base crua.



Fonte: Autor, 2024.

#### 4.5.7 Processo de queima

A queima das composições foi realizada em forno industrial com temperatura máxima de 1.140 °C no tempo de 25 min.

Após a queima, foi realizado um procedimento experimental para testar a impermeabilidade de engobes cerâmicos através da análise da mancha utilizando uma solução alcoólica de corante foi desenvolvido com o objetivo de avaliar a capacidade do engobe de atuar como uma barreira contra a penetração de líquidos.

O teste de impermeabilidade, ou "teste da mancha", foi realizado em peças cerâmicas previamente queimadas, seguindo as quatro formulações de engobes estudadas. Para o teste, foram utilizados copos descartáveis posicionados na parte posterior das peças cerâmicas, sobre os quais foi aplicada uma solução alcoólica de corante. Os copos contendo a solução foram deixados em contato com a superfície cerâmica por um período de 2 minutos. Após esse tempo, os copos foram removidos e o excesso de corante foi cuidadosamente retirado. Em seguida, a superfície foi examinada visualmente.

**Figura 10** - Corpo de prova queimado.



Fonte: Autor, 2024.

**Figura 11** - Solução corante.



Fonte: Autor, 2024.

**Figura 12** - Aplicação do corante no corpo de prova queimado.



Fonte: Autor, 2024.

#### 4.5.8 Resumo do procedimento experimental

##### → Seleção e Preparação das Matérias-Primas

- Obtenção de frita, argila e quartzo da empresa Esmalglass-Itaca.
- Vidro plano e vidro CRT também fornecidos pela Esmalglass-Itaca, utilizados como substitutos parciais da frita.
- Separação dos corpos de prova (bases cerâmicas de 30 cm x 60 cm).

##### → Formulação dos Engobes

- Definição de uma formulação padrão (STD) de engobe.
- Preparação de quatro novas formulações experimentais (F1, F2, F3, F4).
  - F1 e F2: Vidro CRT adicionado em proporções de 5% e 10%.
  - F3 e F4: Vidro plano adicionado em proporções de 5% e 10%.

##### → Moagem das Composições

- Moagem realizada em moinho laboratorial do tipo "periquito", com capacidade de 1 litro.
- Utilização de esferas de alta alumina (750 gramas) para homogeneização.
- Moagem por 13 minutos para garantir granulometria fina e adequada.

##### → Aplicação dos Engobes

- Aplicação das composições sobre as bases cerâmicas com um binil de 0,3 mm.
- Aplicação de esmalte transparente sobre o engobe com binil de 0,5 mm para maior cobertura.

##### → Queima das Amostras

- As peças foram queimadas em forno industrial a 1.140 °C, com duração de 25 minutos.

##### → Análise e Avaliação

- Análise das propriedades estéticas e funcionais das amostras, incluindo aderência, acabamento superficial, e impacto dos vidros reciclados na formulação do engobe.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção, serão abordados os resultados obtidos a partir dos experimentos realizados com vidros reciclados, provenientes de tubos de raios catódicos (CRT) e vidros planos, utilizados como substitutos parciais da frita em formulações de engobes cerâmicos. As comparações entre as formulações padrão e as modificadas, com a incorporação dos vidros reciclados, também serão discutidas à luz dos dados obtidos em ensaios laboratoriais. Essa análise crítica permitirá identificar os benefícios e limitações das novas formulações, destacando o potencial dessas substituições tanto do ponto de vista técnico quanto ambiental e econômico.

### 5.1 Características dos vidros reciclados

A utilização de vidros reciclados, como os provenientes de tubos de raios catódicos (CRT) e vidros planos, em formulações de engobes cerâmicos, oferece uma alternativa sustentável e economicamente viável para a substituição parcial de matérias-primas tradicionais, como a frita. Esses materiais apresentam características químicas que favorecem sua incorporação no processo cerâmico, proporcionando benefícios funcionais e ambientais.

Os tubos de raios catódicos (CRT) possuem uma composição rica em óxidos alcalinos e alcalino-terrosos, como o óxido de potássio ( $K_2O$ ), óxido de sódio ( $Na_2O$ ) e óxido de cálcio ( $CaO$ ), que são essenciais para a formação de vidros. Esses óxidos atuam como fluxantes, reduzindo a temperatura de fusão do engobe durante o processo de queima. Além disso, a presença de óxidos como o de chumbo ( $PbO$ ), no caso de CRTs mais antigos, também contribui para melhorar a fusibilidade e a formação de uma superfície mais homogênea e brilhante, embora deva ser considerado com cautela devido às suas implicações ambientais.

Por outro lado, os vidros planos, geralmente compostos por óxidos como o de silício ( $SiO_2$ ), sódio ( $Na_2O$ ) e cálcio ( $CaO$ ), apresentam uma estrutura estável e resistência a fatores químicos e físicos, o que favorece a aderência e a durabilidade do engobe cerâmico. A elevada quantidade de sílica ( $SiO_2$ ), em torno de 70 a 72% na composição dos vidros planos, garante que o material reciclado tenha um comportamento adequado durante a fusão, contribuindo para a formação de uma camada vítrea uniforme e estável.

A combinação de ambas as fontes de vidro reciclado com outras matérias-primas

cerâmicas tradicionais, como o caulim e a argila, possibilita a criação de formulações de engobes que se destacam pela eficiência no processo de queima e pela qualidade final das peças. Além disso, o uso desses materiais reciclados atende a uma demanda crescente por soluções mais sustentáveis na indústria cerâmica, reduzindo a extração de recursos naturais e promovendo a reutilização de resíduos industriais.

Dessa forma, o emprego de vidros CRT e vidros planos em engobes cerâmicos não só favorece a economia de energia e matéria-prima, como também contribui para uma gestão mais eficiente de resíduos, ao passo que mantém ou até melhora as propriedades técnicas e estéticas das peças cerâmicas.

## **5.2 Análise química dos vidros reciclados**

A análise química dos vidros reciclados antes de sua incorporação na formulação de um revestimento cerâmico é uma etapa essencial por várias razões:

### **5.2.1 Composição Química Controlada**

Vidros reciclados, como os provenientes de tubos de raios catódicos (CRT) e vidros planos, possuem composições químicas variadas, contendo diferentes proporções de óxidos de sódio ( $\text{Na}_2\text{O}$ ), cálcio ( $\text{CaO}$ ), alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), silício ( $\text{SiO}_2$ ) e outros componentes. Realizar a análise química permite identificar os níveis desses óxidos e garantir que estejam dentro das especificações adequadas para o processo cerâmico. Certificar-se da composição correta é fundamental para evitar problemas na fusão, vitrificação e sinterização do revestimento cerâmico durante a queima.

### **5.2.2 Prevenção de Contaminantes Indesejados**

Vidros reciclados podem conter impurezas ou elementos indesejáveis, como metais pesados (ex.: cobre, cádmio) e outros contaminantes que podem afetar negativamente as propriedades finais do revestimento cerâmico. A análise química detecta a presença desses contaminantes e ajuda a decidir se o material reciclado é adequado para uso ou precisa de tratamento adicional para remover impurezas.

### **5.2.3 Consistência e Reprodutibilidade**

A consistência da formulação é essencial para garantir a qualidade final dos

revestimentos cerâmicos. A análise química assegura que a matéria-prima reciclada tenha uma composição estável e padronizada, possibilitando reprodutibilidade no processo industrial. A variação na composição dos vidros pode resultar em diferenças significativas na aparência e nas propriedades físicas do revestimento.

#### **5.2.4 Propriedades Físico-Químicas**

Elementos como óxidos alcalinos ( $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ) e óxidos alcalino-terrosos ( $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ) influenciam diretamente o comportamento térmico e a fusão do material durante a queima. Por exemplo, altas concentrações de  $\text{Na}_2\text{O}$  reduzem a temperatura de fusão do vidro, o que pode alterar o comportamento da formulação cerâmica. Conhecer a composição química permite ajustar a formulação para alcançar o desempenho ideal durante o processo de queima.

#### **5.2.5 Eficiência Energética**

A incorporação de vidros reciclados adequadamente analisados pode reduzir a temperatura de fusão necessária para a sinterização, melhorando a eficiência energética do processo. Isso resulta em uma menor demanda de energia e redução de custos durante a produção cerâmica, além de promover um processo mais sustentável.

#### **5.2.6 Compatibilidade com Outras Matérias-Primas**

Os vidros reciclados são misturados com outros componentes cerâmicos, como argilas, caulins e fritas. A análise química permite avaliar a compatibilidade desses materiais, garantindo que os vidros reciclados não interfiram negativamente nas interações com outras matérias-primas. Isso assegura que a adesão e as propriedades finais do revestimento cerâmico sejam otimizadas.

#### **5.2.7 Controle de Propriedades Estéticas**

A cor e o acabamento do revestimento cerâmico são afetados pela composição química dos vidros incorporados. Desta forma análise química irá prever a tonalidade e o brilho do revestimento, especialmente em casos de esmaltes ou engobes que exigem características estéticas específicas.

A análise química dos vidros reciclados antes de sua incorporação na formulação

cerâmica é crucial para garantir a qualidade, segurança e consistência do produto final. Ela permite o ajuste preciso das formulações, evitando problemas no processamento e garantindo que os revestimentos atendam aos padrões estéticos e funcionais desejados. nas tabelas 3 e 4, é possível observar a análise química dos vidros utilizados neste trabalho.

**Tabela 2** - Análise química do vidro CTR.

Vidro CTR	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SrO	ZrO <sub>2</sub>	BaO	ZnO	PbO
%	57,32	0,3	2,6	0,06	0,71	2,15	7,15	7,56	0,03	6,21	0,95	5,75	0,28	7,73

Fonte: Autor, 2024.

**Tabela 3** - Análise química do vidro plano.

Vidro Plano	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>3</sub>
%	71,51	0,04	1,05	0,19	3,65	9,1	13,65	0,12	0,04	0,24

Fonte: Autor, 2024.

### 5.3 Planejamento das formulações

A formulação inicial para teste do material reciclado, composta por 90% de vidro reciclado (CRT e vidro plano) e 10% de caulim, foi um passo importante na avaliação da viabilidade do uso desses resíduos na composição de engobes cerâmicos. O uso de vidros reciclados como matéria-prima sustentável busca reduzir o impacto ambiental, ao mesmo tempo em que explora suas características químicas e físicas, como o teor de óxidos alcalinos e alcalino-terrosos, que podem influenciar positivamente nas propriedades dos engobes.

O vidro CRT, por exemplo, contém uma quantidade significativa de óxidos alcalinos e óxidos de chumbo, que podem melhorar a fusão do esmalte em baixas temperaturas. Já o vidro plano, composto principalmente de sílica, alumina e cálcio, também contribui para o comportamento do material durante a queima, adicionando resistência e facilitando a formação de uma superfície lisa e homogênea.

A presença de 10% de caulim foi fundamental para a formulação, pois o caulim é conhecido por melhorar a plasticidade e atuar como agente estabilizante na mistura cerâmica. O caulim também influencia a estabilidade do engobe ao evitar retrações excessivas durante a

secagem e queima, mantendo a aderência ao substrato cerâmico.

Durante a preparação das amostras, a pesagem rigorosa com balança semi-analítica foi crucial para garantir a reprodutibilidade dos testes e a precisão dos resultados. A utilização de um copo de plástico para a pesagem reforça a simplicidade do procedimento experimental, que visa explorar o comportamento básico dos materiais reciclados sem a interferência de aditivos complexos.

Na discussão desses resultados, é relevante considerar como as diferentes características entre o vidro CRT e o vidro plano influenciaram o desempenho das composições. A fusibilidade de cada vidro, bem como a interação com o caulim, pode ser analisada para determinar qual dos dois tipos de vidro reciclado proporciona melhores propriedades de fusão e acabamento superficial.

Além disso, o sucesso desta formulação experimental com vidros reciclados pode abrir caminhos para a implementação de processos mais sustentáveis na indústria cerâmica, alinhando-se com as demandas ambientais e de economia circular. A partir dessa formulação inicial, o próximo passo seria otimizar o percentual de cada componente, ajustando as condições de processamento (como tempo e temperatura de queima) para maximizar os benefícios desses materiais reciclados na produção de engobes de qualidade.

#### **5.4 Formulação dos Engobes**

A aplicação das formulações desenvolvidas sobre bases cerâmicas obtidas via seca **imagem 6**, com dimensões de 30 cm x 60 cm, permitiu uma avaliação detalhada da aderência e desempenho dos engobes em condições práticas de uso industrial. As bases cerâmicas utilizadas nesse experimento apresentam propriedades adequadas para essa análise, uma vez que proporcionam uma superfície uniforme e estável, permitindo a avaliação correta da interação entre o engobe e o corpo cerâmico.

O processo de aplicação dos engobes com o uso de um binil de 0,3 mm foi uma escolha técnica significativa para garantir uma camada uniforme. O uso de um binil, que permite o controle preciso da espessura do engobe, é fundamental para evitar irregularidades e defeitos durante o processo de queima, como bolhas ou fissuras. A espessura aplicada diretamente impacta a capacidade do engobe de aderir ao substrato cerâmico e, posteriormente, influencia o desempenho mecânico e estético da peça final.

A aplicação do esmalte transparente sobre o engobe, utilizando um segundo binil de 0,5 mm, teve o objetivo de criar uma camada protetora e estética, além de conferir propriedades funcionais importantes, como resistência à abrasão e impermeabilidade. A escolha de uma abertura maior para a aplicação do esmalte (0,5 mm) em comparação ao engobe (0,3 mm) foi estratégica para garantir uma cobertura espessa e homogênea, o que é essencial para promover um acabamento superficial de alta qualidade. Esse procedimento assegura uma distribuição uniforme do esmalte e evita variações de espessura que poderiam comprometer a estética e a funcionalidade das peças.

O uso repetido desse procedimento de aplicação, de forma padronizada, em todas as amostras, foi crucial para a consistência dos resultados obtidos durante os testes de queima. Ao padronizar o método, foi possível eliminar variáveis externas e assegurar que as diferenças observadas nos resultados finais fossem diretamente atribuídas às diferentes formulações testadas, garantindo maior confiabilidade nos dados.

As análises de acabamento superficial realizadas após a queima confirmaram a importância da metodologia aplicada. As amostras que receberam camadas uniformes de engobe e esmalte apresentaram superfícies lisas, com excelente qualidade estética e ausência de defeitos visuais. Isso sugere que as formulações desenvolvidas, em conjunto com o método de aplicação, são eficazes e viáveis para uso em revestimentos cerâmicos de alta qualidade. Além disso, a aplicação uniforme e o comportamento adequado durante a queima indicam que as formulações possuem um bom balanço entre fusibilidade e estabilidade térmica.

A metodologia adotada também proporcionou uma avaliação precisa das propriedades funcionais das composições testadas, como resistência ao desgaste, adesão ao corpo cerâmico e resistência a variações térmicas. Esses resultados são fundamentais para a análise final dos materiais cerâmicos desenvolvidos, uma vez que permitem uma avaliação direta da viabilidade técnica e comercial das formulações.

De maneira geral, a metodologia proposta para aplicação e teste das formulações de engobe e esmalte demonstrou ser eficiente, tanto do ponto de vista experimental quanto no contexto industrial. Os resultados obtidos sugerem que as composições testadas possuem potencial significativo para o uso em larga escala, combinando estética e desempenho funcional de maneira eficaz.

## 5.5 Análise do produto acabado

A importância do engobe na cerâmica vai além de sua função estética; ele desempenha um papel fundamental na impermeabilização e resistência a agentes químicos, como produtos de limpeza. O engobe atua como uma camada protetora entre o corpo cerâmico e o esmalte, melhorando as propriedades funcionais da peça e garantindo maior durabilidade em condições adversas.

A impermeabilidade do engobe é crucial, especialmente em revestimentos cerâmicos utilizados em áreas sujeitas à umidade, como cozinhas e banheiros. O engobe impede que a água e outros líquidos penetrem no corpo cerâmico, o que poderia causar fragilidade, inchaço ou desintegração da peça ao longo do tempo. Quimicamente, essa impermeabilidade é garantida pela presença de sílica ( $\text{SiO}_2$ ) e alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) nas formulações do engobe. Esses óxidos formam uma matriz vítrea durante o processo de queima, selando os poros do material cerâmico e criando uma barreira efetiva contra a passagem de líquidos.

Além disso, a adição de fritas cerâmicas, que são compostas por óxidos como  $\text{Na}_2\text{O}$  (óxido de sódio),  $\text{K}_2\text{O}$  (óxido de potássio) e  $\text{CaO}$  (óxido de cálcio), contribui para a fusão e vitrificação da superfície do engobe. A presença desses fluxantes na composição do engobe reduz a temperatura de fusão da mistura e favorece a formação de uma camada vítrea mais uniforme e densa, aumentando ainda mais sua resistência à penetração de líquidos.

A resistência do engobe a agentes químicos, como produtos de limpeza, também é uma característica crítica, especialmente para peças de revestimento que são expostas a substâncias agressivas no uso diário. Muitos produtos de limpeza, como detergentes alcalinos e ácidos, contêm compostos que podem interagir com o esmalte e engobe cerâmicos. No entanto, a composição química adequada do engobe garante que ele resista à degradação e ao ataque químico, preservando a integridade da superfície cerâmica.

A resistência química do engobe é proporcionada, principalmente, por óxidos estáveis, como  $\text{SiO}_2$  (sílica) e  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (alumina), que formam ligações covalentes fortes, criando uma estrutura cristalina ou vítrea que não reage facilmente com ácidos ou bases. A sílica, em particular, forma uma rede tridimensional robusta, enquanto a alumina aumenta a estabilidade térmica e a resistência à corrosão química.

Além disso, óxidos alcalino-terrosos, como  $\text{CaO}$  (óxido de cálcio) e  $\text{MgO}$  (óxido de

magnésio), conferem maior resistência à lixiviação química. Esses óxidos aumentam a durabilidade da superfície do engobe, impedindo que produtos químicos penetrem e causem degradação. Por exemplo, o CaO e MgO têm baixa solubilidade em água e resistem bem à ação de agentes ácidos, comuns em produtos de limpeza domésticos.

Outro aspecto relevante é o uso de titânia ( $\text{TiO}_2$ ), que é comumente adicionada para aumentar a resistência química do engobe. O  $\text{TiO}_2$  não só melhora a opacidade do engobe, conferindo propriedades estéticas desejáveis, como também aumenta sua resistência à corrosão e ao ataque químico. A presença desse composto inibe reações com ácidos fortes e prolonga a vida útil da superfície cerâmica.

A formulação de um engobe com a presença adequada de óxidos como:  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , CaO e  $\text{TiO}_2$  é essencial para proporcionar propriedades funcionais avançadas, como impermeabilidade e resistência a produtos de limpeza e agentes químicos. Esses elementos criam uma barreira química e física, que preserva a integridade do corpo cerâmico e assegura que o revestimento mantenha suas propriedades ao longo do tempo, mesmo sob condições de uso intenso. Dessa forma, o engobe desempenha um papel vital tanto na estética quanto na durabilidade das peças cerâmicas.

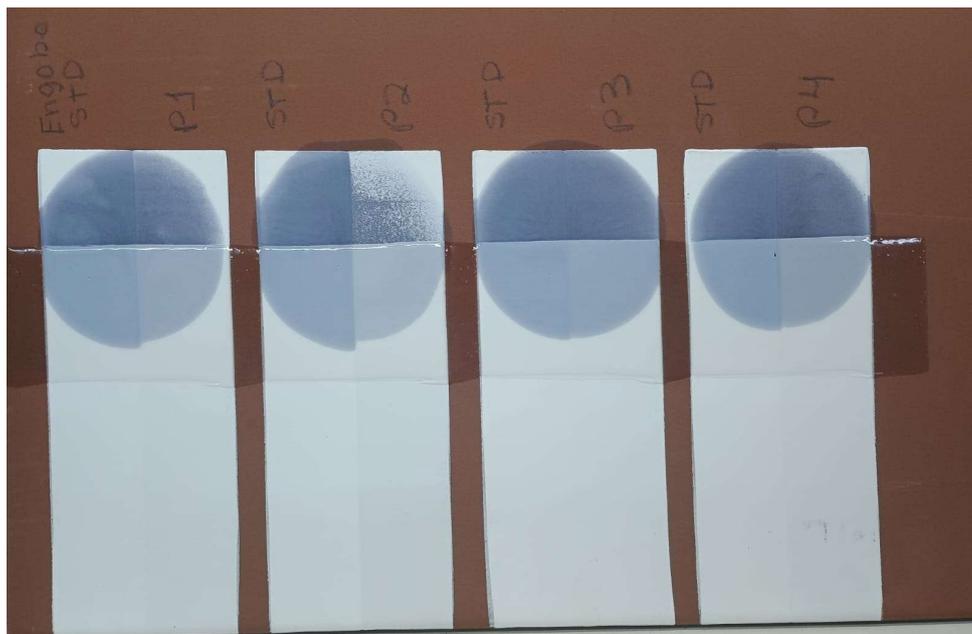
## 5.6 Teste da mancha

O método de aplicação da solução alcoólica de corante tem como base a penetração do líquido através de possíveis porosidades ou microfissuras na superfície do engobe. Caso o engobe apresente uma estrutura inadequada, com poros ou falhas, a solução colorida será absorvida, resultando na formação de manchas visíveis. A análise visual, realizada após a remoção do corante, permitiu identificar a presença ou ausência de manchas, servindo como um indicativo direto da eficiência da formulação em criar uma barreira impermeável. O material também foi submetido a uma análise de resíduo, utilizando uma peneira de malha de 45  $\mu\text{m}$ , sendo o percentual de material retido mantido entre 4% e 5%. Essa etapa é crucial para garantir a qualidade e a uniformidade das composições cerâmicas, influenciando diretamente as propriedades finais dos materiais, como a reatividade durante a sinterização e a formação de fases vítreas ou cristalinas.

A observação das manchas, ou sua ausência, foi um critério fundamental para a avaliação das quatro formulações testadas. As formulações que demonstraram menor manchamento apresentaram melhores resultados quanto à impermeabilidade, sendo mais adequadas para

aplicações em superfícies cerâmicas que demandam resistência a agentes líquidos. Isso valida a escolha de determinados componentes, como os vidros reciclados, na busca por composições mais sustentáveis e eficazes em termos de impermeabilidade e resistência química.

**Figura 13** - Avaliação do teste da macha.



Fonte: Autor, 2024.

Conforme é observado na imagem, é possível notar que a prova 3 (P3) é a que mais se iguala ao padrão, sendo igual com relação a cor, e ainda melhor com relação a mancha, pois é possível observar que a mancha no padrão (STD) do lado esquerdo tem a mancha um pouco mais intensa.

As provas P1, P2 e P4, todas são mais eficientes que o STD com relação a mancha, porém em cor e tonalidade, não foi possível atingir igualdade com o padrão. Nesse estudo isso é importante pois foi tudo feito com base em uma composição padrão. Mas isso não descarta a possibilidade que essas provas podem ser comercializadas, tudo vai depender da necessidade desejada sobre as características visuais dos materiais.

O teste de impermeabilidade nos engobes contendo frita opaca rica em titânio e vidros

reciclados demonstrou a importância da composição química na resistência à penetração de líquidos e agentes químicos. O óxido de titânio ( $\text{TiO}_2$ ) desempenhou um papel fundamental na formação de uma superfície densa e impermeável. Além disso, elementos como a sílica ( $\text{SiO}_2$ ), o óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), e fluxantes como  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{CaO}$  e  $\text{MgO}$ , presentes tanto nas fritas quanto nos vidros reciclados utilizados, foram cruciais para a formação de uma matriz vítrea com baixa porosidade. Esses componentes facilitaram a fusão das composições e a criação de uma camada vitrificada e resistente. A análise visual pós-teste comprovou a eficácia dessas formulações com base na formulação padrão, com superfícies que apresentaram pouca ou nenhuma absorção, validando o uso de vidros reciclados como substitutos eficientes nas formulações de engobes para revestimentos cerâmicos de alta performance.

### 5.7 Viabilidade econômica na utilização dos vidros reciclados

Com relação a viabilidade econômica, é possível fazer uma avaliação com relação aos valores em Kg dos vidros reciclados e da frita a qual foi substituída em porcentagem pelos vidros.

Na avaliação de viabilidade econômica para a substituição parcial da frita por vidros reciclados nas formulações de engobes cerâmicos, é fundamental analisar os custos envolvidos com base nos preços unitários fornecidos pela empresa Esmalglass. O vidro CRT tem um custo de R\$ 1,90 por quilograma, o vidro plano custa R\$ 1,60 por quilograma, enquanto a frita, um material mais caro, custa R\$ 3,55 por quilograma.

Para o cálculo da economia gerada pela substituição parcial de frita por vidros reciclados, vamos considerar uma quantidade total de 1 tonelada (1.000 kg) de frita, e as substituições parciais de 5% e 10% pelos vidros reciclados serão analisadas. Para facilitar a análise, vamos converter esses valores para toneladas (1.000 kg):

- 1 tonelada de vidro CRT:  $\text{R\$ } 1,90 \times 1.000 \text{ kg} = \text{R\$ } 1.900,00$
- 1 tonelada de vidro plano:  $\text{R\$ } 1,60 \times 1.000 \text{ kg} = \text{R\$ } 1.600,00$
- 1 tonelada de frita opaca:  $\text{R\$ } 3,55 \times 1.000 \text{ kg} = \text{R\$ } 3.550,00$

Agora, vamos calcular a economia gerada pela substituição parcial de frita opaca por vidro reciclado (CRT e plano) em proporções de 5% e 10%, considerando de 1 tonelada da frita.

**Substituição de 5% de frita por vidro reciclado:****Substituindo 5% da frita por vidro CRT:**

- Quantidade de frita substituída: 5% de 1.000 kg = 50 kg
- Custo da frita para 50 kg:  $50 \text{ kg} \times \text{R\$ } 3,55 = \text{R\$ } 177,50$
- Custo do vidro CRT para 50 kg:  $50 \text{ kg} \times \text{R\$ } 1,90 = \text{R\$ } 95,00$
- **Economia com essa substituição:**  $\text{R\$ } 177,50 - \text{R\$ } 95,00 = \text{R\$ } 82,50$

**Substituindo 5% da frita por vidro plano:**

- Quantidade de frita substituída: 5% de 1.000 kg = 50 kg
- Custo da frita para 50 kg:  $50 \text{ kg} \times \text{R\$ } 3,55 = \text{R\$ } 177,50$
- Custo do vidro plano para 50 kg:  $50 \text{ kg} \times \text{R\$ } 1,60 = \text{R\$ } 80,00$
- **Economia com essa substituição:**  $\text{R\$ } 177,50 - \text{R\$ } 80,00 = \text{R\$ } 97,50$

**Substituição de 10% de frita por vidro reciclado:****Substituindo 10% da frita por vidro CRT:**

- Quantidade de frita substituída: 10% de 1.000 kg = 100 kg
- Custo da frita para 100 kg:  $100 \text{ kg} \times \text{R\$ } 3,55 = \text{R\$ } 355,00$
- Custo do vidro CRT para 100 kg:  $100 \text{ kg} \times \text{R\$ } 1,90 = \text{R\$ } 190,00$

**Economia com essa substituição:**  $\text{R\$ } 355,00 - \text{R\$ } 190,00 = \text{R\$ } 165,00$

**Substituindo 10% da frita por vidro plano:**

- Quantidade de frita substituída: 10% de 1.000 kg = 100 kg
- Custo da frita para 100 kg:  $100 \text{ kg} \times \text{R\$ } 3,55 = \text{R\$ } 355,00$
- Custo do vidro plano para 100 kg:  $100 \text{ kg} \times \text{R\$ } 1,60 = \text{R\$ } 160,00$

**Economia com essa substituição:**  $\text{R\$ } 355,00 - \text{R\$ } 160,00 = \text{R\$ } 195,00$

**Avaliação geral:**

Economia substituindo 5% da frita por vidro CRT: R\$ 82,50 por tonelada.

Economia substituindo 5% da frita por vidro plano: R\$ 97,50 por tonelada.

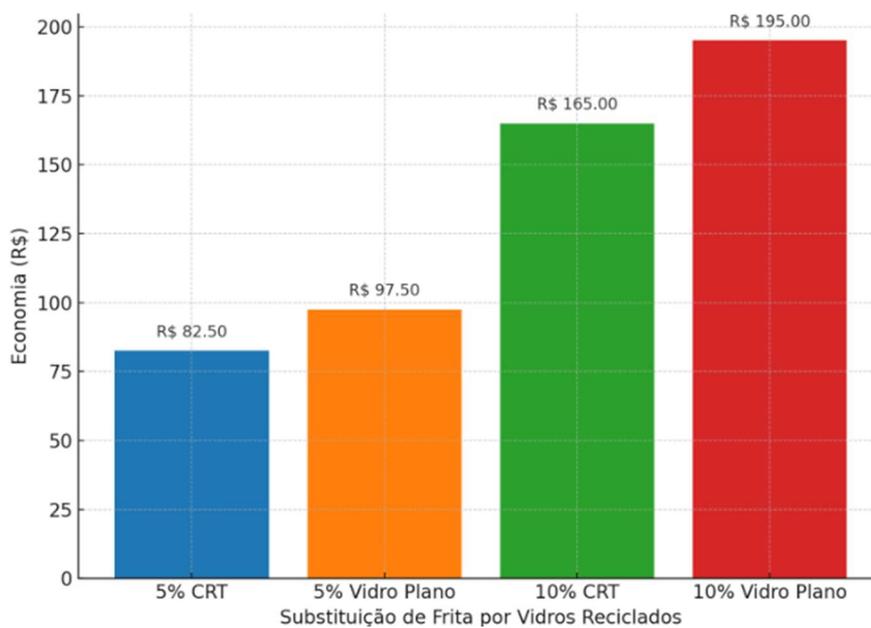
Economia substituindo 10% da frita por vidro CRT: R\$ 165,00 por tonelada.

Economia substituindo 10% da frita por vidro plano: R\$ 195,00 por tonelada.

A substituição parcial da frita opaca por vidros reciclados (CRT e vidro plano) oferece uma redução de custos considerável. A substituição de 10% de frita por vidro plano, por exemplo, gera uma economia de R\$ 195,00 por tonelada. Além do benefício econômico, o uso de vidros reciclados contribui para práticas mais sustentáveis e ambientalmente responsáveis, reduzindo a dependência de matérias-primas caras e não recicladas, sem comprometer a qualidade do produto final.

Esses valores mostram que, em larga escala, a economia pode se tornar ainda mais expressiva, tornando a substituição uma alternativa viável e competitiva para a indústria de materiais cerâmicos.

**Figura 14** - Economia gerada pela substituição de frita por vidros reciclados.



Fonte: Autor, 2024.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A utilização de vidros reciclados nas formulações de engobes cerâmicos vai além dos benefícios econômicos, trazendo também impactos positivos no aspecto socioambiental. Ao incorporar resíduos de vidro CRT e vidro plano no processo produtivo, a indústria cerâmica contribui significativamente para a redução de descarte desses materiais, que muitas vezes acabam em aterros ou são de difícil reciclagem devido à sua composição química. Essa prática favorece a diminuição do consumo de matérias-primas naturais, como a frita opaca, e promove uma economia circular, onde os resíduos se transformam em recursos. Além disso, ao reduzir a extração de novos materiais e o descarte inadequado de resíduos, a indústria contribui para a preservação ambiental, ao mesmo tempo que incentiva práticas sustentáveis e mais responsáveis socialmente, criando um ciclo de produção mais consciente e alinhado às demandas ambientais contemporâneas.

Este trabalho explorou a viabilidade técnica e econômica da substituição parcial de fritas cerâmicas por vidros reciclados, como o vidro CRT e vidro plano, em formulações de engobes. A análise se pautou em uma avaliação abrangente, que envolveu a caracterização química dos materiais, a otimização das formulações e o estudo das propriedades finais dos revestimentos aplicados em substratos cerâmicos.

Os resultados obtidos mostraram que a substituição de frita opaca por vidros reciclados pode gerar economia significativa nos custos de produção, sem comprometer as propriedades fundamentais dos engobes cerâmicos, como a aderência e a qualidade do acabamento superficial. Em uma escala industrial, a utilização de 5% e 10% de vidro CRT ou vidro plano, em substituição à frita, trouxe uma economia financeira notável, variando de R\$ 82,50 a R\$ 195,00 por tonelada de material produzido.

Além dos benefícios econômicos, o uso de vidros reciclados apresentou vantagens ambientais relevantes. A reciclagem de vidro não apenas reduz a dependência de matérias-primas virgens, mas também diminui a quantidade de resíduos sólidos destinados a aterros, contribuindo para uma produção mais sustentável. Dessa forma, este trabalho reforça a importância da incorporação de materiais reciclados na indústria cerâmica, proporcionando uma solução ecologicamente correta e economicamente viável.

Por fim, conclui-se que a substituição parcial de frita por vidro reciclado nas formulações de engobes é uma estratégia promissora para o setor cerâmico, especialmente em um cenário onde a sustentabilidade e a competitividade são essenciais.

### **6.1 Perspectivas futuras**

Recomendam-se estudos futuros para avaliar a aplicabilidade dessa substituição em diferentes tipos de produtos cerâmicos e a longo prazo, de forma a maximizar os benefícios econômicos e ambientais para a indústria. As perspectivas futuras para o uso de vidros reciclados em engobes cerâmicos incluem a continuidade de estudos que aprofundem a compreensão de suas propriedades e aplicações, consolidando esta abordagem como uma solução inovadora e sustentável para a indústria cerâmica. A viabilidade econômica já demonstrada, aliada aos significativos benefícios ambientais, como a redução do descarte de resíduos e da extração de matérias-primas naturais, reforça o potencial desse método para contribuir com práticas mais responsáveis no setor. Pesquisas futuras podem explorar melhorias no processamento de vidros reciclados e avaliar o impacto ambiental em larga escala, promovendo uma produção mais eficiente, alinhada às demandas globais por sustentabilidade.

**REFERÊNCIAS**

BARACHO, Paulo Roberto; CLAUDINO, Fernanda Emanuela; SILVA, Carla de Souza; CASALI, Graziela Pereira; SILVA, Valdinete Lins e; LONGO, Elson; WEBER, Ingrid Távora. **Análise do Teor de Chumbo em Louças Utilitárias Comercializadas no Brasil.** Cerâmica Industrial, v. 17, n. 4, p. 36-40, jul./ago. 2012. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.4322/cerind.2014.023>.

CALLISTER JR, William D.; RETHWISCH, David G. **Ciência e engenharia de materiais – uma introdução.** 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

CIPRIANO, Ana P.; MAGAGNIN, Daniel; BITTENCOURT, Eduarda B.; CORRÊA, Maria E. N.; POLICARPO, Nathalia; SILVA, Vanessa da. **Análise da Substituição Proporcional de Frita Branca por Vidro Plano Reciclado em Engobes para Revestimento Cerâmico.** Cerâmica Industrial, v. 22, n. 4, p. 47-51, jul./ago. 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.4322/cerind.2017.020>.

JUNIOR, Marsis Cabral et al. **Estudo Estratégico da Cadeia Produtiva da Indústria Cerâmica no Estado de São Paulo: Parte III–Indústrias de Colorifícios, Sanitários e Cerâmica Técnica-Isoladores.** Cerâmica Industrial, v. 24, n. 3, p. 21-26, 2019.

KARAAHMET, O.; CICEK, B. **Waste recycling of cathode ray tube glass through industrial production of transparent ceramic frits.** Journal of the Air & Waste Management Association, v. 69, n. 10, p. 1258-1266, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/10962247.2019.1654037>.

NANDI, V. S.; RAUPP-PEREIRA, F.; MONTEDO, O. R. K.; OLIVEIRA, A. P. N. **O uso de lodo cerâmico e vidro reciclado na obtenção de engobes para a fabricação de revestimentos cerâmicos.** ScienceDirect, 2015.

OLIVEIRA, Antônio Pedro Novaes de. **Tecnologia de Fabricação de Revestimentos Cerâmicos.** Cerâmica Industrial, v. 5, n. 6, p. 8-13, nov./dez. 2000.

OLIVEIRA, Antônio Pedro Novaes de; HOTZA, Dachamir. **Tecnologia de fabricação de revestimentos cerâmicos.** 2. ed. rev. Florianópolis: Ed. da UFSC, 2015.

PRACIDELLI, Sebastião. **Estudo dos Esmaltes Cerâmicos e Engobes**. Cerâmica Industrial, v. 13, n. 1/2, p. 32-38, jan./abr. 2008.

REVELO, Raul J.; MENEGAZZO, Ana P.; FERREIRA, Eduardo B. **Cathode-Ray Tube panel glass replaces frit in transparent glazes for ceramic tiles**. Ceramics International, v. 44, n. 12, p. 13790-13796, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.04.222>.

SÁNCHEZ, E. **Matérias-primas para a fabricação de fritas e esmaltes cerâmicos**. Cerâmica Industrial, v. 2, n. 3/4, p. 18-23, 1997.

TAMAYO, A.; RUBIO, F.; OTEO, J. L.; RUBIO, J. **Influência de la molienda en la energía superficial de fritas para esmaltes**. Instituto de Cerámica y Vidrio. CSIC. c/Kelsen, nº 5. Campus Cantoblanco. 28049 Madrid.

ZANATA, Luiz Otávio da Soller; NANDI, Vitor de Souza. **Estudo da Utilização de Resíduo Sólido Proveniente do Processo de Fabricação de Fritas para a Produção de Esmaltes Cerâmicos**. Cerâmica Industrial, v. 19, n. 1, p. 43-47, jan./fev. 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.4322/cerind.2014.060>.